초고층 건축물의 기초 설계 사례연구

Case Study on the Foundation Design of Super High-rise Buildings

김현우* · 오태민** · 김민관*** · 이종원**** · 백용*****

Kim, Hyunwoo*, Oh, Tae-Min**, Kim, Min-Koan***, Lee, Jong-Won****, and Baek, Yong*****

Abstract

Construction of super high-rise buildings has increased rapidly over the past 20 years, especially being concentrated in Asia such as China, UAE, and South Korea. These growing demands for super high-rise buildings are presenting new challenges to structural and geotechnical engineers, and foundation designers are required to use more-sophisticated analysis and design methods considering bearing capacity and settlement of foundations, wind- and seismically-induced loads, appropriate safety factors, and so on. This case study introduces characteristics of very tall buildings affecting foundation design and outlines a typical design procedure. Foundation types of top 21 high-rise buildings in South Korea are listed, and piled-raft foundations of three world-renowned buildings are presented. It is anticipated that this case study will provide design information on the domestic super high-rise building foundations and be used as the reference materials for designing an initial concept model or a numerical simulation model.

Key words : Super High-rise Building, Building Foundation, Design, Case Study

요 지

초고층 건축물 건설은 지난 20여 년간 급격히 증가하고 있으며, 특히 우리나라와 중국, 아랍에미리트 등 아시아 지역에 집중되고 있다. 초고층 건축물에 대한 이러한 수요 증가로 인해 구조 및 지반공학분야 엔지니어에게는 새로운 도전과제가 주어지고 있으며, 건축물 기초분야에서도 보다 정교한 방식으로 수직하중에 대한 지지력과 침하, 풍하중과 지진하중 등에 의한 동적 거동, 적정 안전율 등을 고려한 분석과 설계가 수행되도록 요구받고 있다. 본 사례연구에서는 기초 설계에 영향을 미치는 초고층 건축물의 특성과 이에 근거한 일반적인 설계 절차를 소개하고, 층수 기준 국내 상위 21개 초고층 건축물의 기초 설계자료를 조사하였다. 국외 사례는 말뚝지반 전면기초가 적용된 대표적 초고층 건축물을 살펴보았다. 본 사례연구가 국내의 초고층 건축물 기초에 대한 현황 정보를 제공하는 한편, 개념설계를 위한 초기모델이나 지진 등 재난 시나리오 검토 등을 위한 대표모델을 구성하는 단계에서 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

핵심용어 : 초고층 건축물, 건축물 기초, 설계, 사례연구

1. 서 론

초고층 건축물 건설은 Fig. 1에서 확인되는 바와 같이 지난 20여 년간 급격히 증가하였다. 세계초고층도시건축연

합(Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH)에 따르면 전 세계적으로 높이 200 m 이상인 건축물은 1996년까지 201개소가 완공되었으나 이후 2016년까지 973개가 추가 완공되어 484% 이상 증가하였다. 특히 중국과 중동지역,

*정회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 선임연구원(E-mail: hyunwoo.kim@kigam.re.kr)

Member, Senior Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**교신저자, 정회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 선임연구원(Tel: +82-42-868-3241, Fax: +82-42-868-3416, E-mail: tmoh@kigam.re.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

***한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 연구원

Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

****한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 연구원

Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*****한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 연구단장

Director, MDCO, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

우리나라 등의 아시아에 초고층 건설이 집중되고 있는데, 상기 973개 건축물 가운데 절반에 해당하는 486개소가 중국에 건설되었다(CTBUH, 2017).

Fig. 1. Number of Completed Super High-rise Buildings Across the Globe (≥ 200 m) (CTBUH, 2017)

이와 같은 초고층 건축물의 급격한 증가는 구조 및 지반공학분야 엔지니어에게 새로운 도전과제가 되고 있다. 건축물의 높이가 높아질수록 기존 시공사례에 기반한 검증된 방법에서 벗어나 보다 정교한 방식으로 분석과 설계를 수행하도록 요구받고 있으며, 건축물 기초 설계에도 최신 기법이 적용되는 사례가 점점 더 늘고 있다(Poulos, 2016).

초고층 구조물의 큰 하중을 기초 시스템에서 안전하게 지지해야 하므로 지진하중이 기초 시스템에 미치는 영향을 분석하고 대비하는 것 역시 매우 중요하다. 지진에 의한 반복하중 작용 시 말뚝기초가 하중 작용방향의 반대방향으로 운동하게 되고 기초 주위 지반에 탄성한계를 초과하는 변위가 일어나면 말뚝기초와 지반 사이에 빈 공간이나 틈이 생길 수 있다. 이러한 말뚝지반 분리영역이 확대되면 기초의 하중 지지 또는 저항능력이 감소된다(Earthquake Engineering Society of Korea, 1999). 또한 Martin and Lam(1995)에 따르면 과거 지진발생 사례를 봤을 때 기초 주변 또는 하부에서의 액상화로 인한 횡방향 또는 연직 지지력 감소, 액상화 이후 발생한 지반 변위 또는 측방퍼짐(lateral spreading)으로 말뚝기초가 파괴될 수도 있다.

그러나 다수의 사람들이 이용하거나 거주하는 상부구조에 대한 시공사례 소개와 설계 분석은 매우 활발하게 이루어지는 데 비해, 구조물 기초 시스템 관련 현황조사 및 분석 자료는 상대적으로 접하기가 쉽지 않다. 이로 인해 개념설계를 위한 초기모델, 지진 등 재난 시나리오 검토 등을 위한 대표모델 등을 구성하고자 할 때 참조할 수 있는 초고층 건축물 기초 관련 정보가 다소 제한적인 실정이다.

본 사례연구에서는 지하공간 개발의 주요분야 중 하나인 초고층 건축물 기초 관련 일반사항과 현황에 대해 개략적으로 살펴보았다. 먼저 기초 설계에 영향을 미치는 초고층 건축물의 특성과 이에 근거한 일반적인 설계 절차를 소개하였다. 국내 초고층 건축물의 기초 현황을 파악할 수 있도록

롯데월드타워를 포함한 상위 21개 건축물의 기초 시공 사례를 조사하였으며, 국외 사례의 경우 말뚝지지 전면기초(piled raft foundation)의 대표적 사례를 간략히 정리하였다. 끝으로 초기 개념설계 시, 또는 수치해석이나 모형실험을 위한 대표 모델 구성 시 자료에 기반을 둔 추정이 가능하도록 기존 초고층 건축물 기초 요소의 설계 범위를 제시하였다.

2. 초고층 건축물 건설 동향 및 건축물 기초 설계

CTBUH는 건축물 높이에 따라 고층 건축물을 ‘tall’, ‘supertall’, ‘megatall’로 구분한다. Tall은 14층 이상 또는 높이 50 m 이상인 건축물이며, 이 중에서 높이가 300 m 이상인 건축물은 supertall로, 600 m 이상일 때는 megatall로 분류한다. 국내에서는 초고층 건축물에 대해 이와 다른 기준을 적용하며, 건축법 시행령(MOLIT, 2014)에 따라 층수가 50층 이상이거나 높이가 200 m 이상인 건축물을 초고층 건축물(1)로 분류한다.

이러한 국내 기준을 적용해 보면 전 세계적으로 2016년까지 완공된 200 m 이상 초고층 건축물은 1,174개소이며, 2017년 완공되었거나 건설 중인 건축물은 500개소이다. 국가별로 보면 2016년 기준 완공된 초고층 건축물의 43%에 해당하는 500개 건축물이 중국에 있으며, 건설 중인 건축물도 249개소에 이른다. 그 외 미국(완공 174개소, 건설 43개소), 아랍에미리트(완공 91개소, 건설 22개소), 대한민국(완공 57개소, 건설 9개소) 순서로 초고층 건축물을 보유하고 있다.

높이별 분포(Fig. 2)를 살펴보면 초고층 건축물의 대부분은 300 m 미만이며, CTBUH 기준 megatall에 해당하는 높이

Fig. 2. Height Distribution of Super High-rise Buildings in the World (CTBUH, 2017)

1) 건축물 높이는 지표면으로부터 건축물 상단까지의 높이이며, 지하층은 층수에 산입하지 않음. 높이와 층수 산정 시 건축물의 옥상 부분(승강기탑, 계단탑, 망루, 장식탑, 옥탑 등) 포함 여부는 건축법 시행령에 따라 해당 부분의 수평 투영면적 합계와 건축면적의 비에 의해 결정됨.

600 m 이상 완공된 건축물은 3개소로 Burj Khalifa(아랍에미리트, 828m), Shanghai Tower(중국, 632 m), Makkah Royal Clock Tower(사우디아라비아, 601 m)가 있다. 또 Jeddah Tower(사우디아라비아, 1,000 m), Wuhan Greenland Center(중국, 636 m), Merdeka PNB118(말레이시아, 630 m), Rama IX Super Tower(태국, 615 m) 4개소는 2018-21년 사이 완공을 목표로 건설 중에 있다.

Poulos(2016)는 다수의 설계 경험에 근거하여 초고층 건축물의 기초 설계 시 고려해야 할 사항을 다음과 같이 정리하였다.

- 건축물의 중량, 즉 기초가 지지해야 할 수직하중이 상당히 클 수 있음. 건축물의 중량이 높이에 따라 비선형적으로 증가할 수 있으므로 극한지지력과 침하량 둘 다 주의 깊게 검토되어야 함.
- 고층 건축물 주변은 대개 하중이 훨씬 작은 포디엄(podium) 구조물로 둘러 싸여 있어서 고층부와 저층부 사이 발생할 수 있는 부등침하를 제어할 필요가 있음.
- 풍하중에 의한 수평하중과 그로 인해 기초에 작용하는 모멘트가 매우 클 수 있음. 이 모멘트는 기초에 수직하중으로 작용할 수 있으며, 특히 외곽 기초에 영향을 줄 수 있음. 말뚝의 구조 설계 시에는 이러한 증가된 하중을 고려할 필요가 있음.

- 풍하중에 의한 수평하중과 모멘트는 주기적으로 작용하며 이는 기초의 지지력을 감소시키고 침하를 유발할 수 있기 때문에 수직 및 수평하중의 주기적 작용이 기초 시스템에 미치는 영향을 고려할 필요가 있음.
- 지진의 작용(seismic action)은 구조물에 수평력을 유발하고 구조물을 지지하고 있는 지반의 수평이동도 유발함. 이때 1) 구조물의 수평 가진에 의한 관성력 및 모멘트, 2) 말뚝과 반대로 움직이는 지반에 의해 기초 말뚝에 유발된 운동학적 힘과 모멘트, 이 두 가지 메커니즘에 의해 기초에 추가적인 수평력과 모멘트가 유발될 수 있음.
- 풍하중 또는 지진하중과 구조물의 공진(resonance) 발생 가능성을 평가할 필요가 있음. 공진은 여러 요소에 좌우되지만 기초 시스템의 강성과 감쇠 특성도 영향을 미침.
- 초고층 건축물의 고유진동주기는 매우 길 수 있으나(10 초 이상), 바람이나 지진과 같은 동하중원의 탁월주기(predominant period)는 이보다 훨씬 짧음. 그러나 고차 진동모드 중에서 일부는 상당히 짧은 고유주기를 가지며 바람 또는 지진의 작용으로 가진될 수 있음. 이러한 주기는 기본적으로 구조적 특성에 좌우되지만 기초 시스템의 반응 특성에도 영향을 받을 수 있음.

초고층 건축물 기초 설계는 대개 Fig. 3과 같이 개념-상세

Fig. 3. Overall Foundation System Design Process of Super High-rise Building based on Abdelrazaq et al. (2011)

—사후설계 세 단계에 걸쳐 수행된다(Abdelrazaq et al., 2011). 개념설계에서는 이용가능한 지반공학적 정보를 토대로 단순한 형태의 지반 모델을 구성하여 기초 시스템의 거동을 대략적으로 평가하고 다수의 후보군을 마련한다. 이때 초고층 건축물의 중량, 수평하중, 거동 등 상부구조의 특성과 기초 지지력 및 강성 등이 모두 적절하게 고려될 수 있도록 구조 및 지반공학 두 분야의 협업이 매우 중요하다. 이후 지반조사 및 상세설계를 통해 여러 후보군 중에서 적용안이 선별되며, 주로 하중 조합, 기초 시스템, 지반조건 및 특성을 중심으로 검토한다. 그리고 앞서 언급된 지지력, 부등침하, 주기적 하중 작용 등 여러 핵심 사안이 고려된다. 사후설계에서는 본격적인 기초 시공에 앞서 말뚝 하중시험 등을 현장에서 실시하여 설계를 보완하고, 이후에도 상부 구조물 건설 중에 측정된 값과 수치모델의 해석 결과를 지속적으로 비교하면서 지반 물성 등을 보정하고 향후 거동을 예측한다.

3. 초고층 건축물 기초 현황

3.1 국내 건축물의 기초 형식 및 제원

국토교통부가 발표한 건축물 현황 자료(MOLIT, 2017)에 따르면 2016년 기준 50층 이상 완공된 초고층 건축물이 전국에 102개소 있으며 15개 건축물이 건설 중(높이 200 m 이상은 완공 또는 건설 중인 건축물이 66개소 있음)에 있다. 지역 분포를 보면 Fig. 4와 같이 부산광역시에 27개소로

가장 많으며, 서울을 비롯한 수도권에 55개소가 위치해 상위 4개 지역에 전체의 80%가 분포한다. 롯데월드타워를 포함하여 건설 중인 것으로 조사된 50층 이상 건축물도 부산 11개소, 서울 4개소에 위치해 부산지역에 초고층 건축물이 집중적으로 건설되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Regional Distribution of Super High-rise Buildings (≥ 50 floors) in South Korea (MOLIT Architectural Administration Information System, 2017)

본 사례연구에서는 국내 초고층 건축물 기초 특성 파악을 위해 이 중에서 층수 기준 상위 20개 건축물과 2017년 2월 준공된 롯데월드타워를 대상으로 하여 시공사례를 조사하고 기초형식과 제원을 정리하였다(Table 1, Fig. 5).

Table 1. Foundation Types of Super High-rise Buildings in South Korea (based on data as of year-end 2016) (MOLIT, 2017)

#	Building Name	Height (m)	Floors above ground	City	Foundation type	References
1	Doosan Haeundae We've the Zenith, Tower A	300	80	Busan	<ul style="list-style-type: none"> Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 3.8 m Concrete strength: 35 MPa 	Kim (2011) Noh et al. (2008) Park and Park (2008)
2	Doosan Haeundae We've the Zenith, Tower B	282	75	Busan	<ul style="list-style-type: none"> Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 3.8 m Concrete strength: 35 MPa 	
3	Haeundae I'Park Marina, Tower 2	292	72	Busan	<ul style="list-style-type: none"> RCD pile <ul style="list-style-type: none"> Pile diameter: 2.0 m, 2.5 m Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 4.0 m Concrete strength: 40 MPa 	Lee et al. (2012)
4	Doosan Haeundae We've the Zenith, Tower C	265	70	Busan	<ul style="list-style-type: none"> RCD pile (see Fig. 5a) <ul style="list-style-type: none"> Pile diameter: 2.5 m (101 piles) Allowable bearing capacity: 30-50 MN/ea Center-to-center distance: 5.0 m Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 3.5 m Concrete strength: 35 MPa 	Kim (2011) Noh et al. (2008) Park and Park (2008)

Table 1. (Continued)

#	Building Name	Height (m)	Floors above ground	City	Foundation type	References
5	Mokdong Hyperion, Tower A	256	69	Seoul	<ul style="list-style-type: none"> • Mat foundation - Thickness: 3.0 m - Concrete strength: 40 MPa 	Chung (2003) Jung (2004)
6	Tower Palace Three, Tower G	264	69	Seoul	<ul style="list-style-type: none"> • Mat foundation - Thickness: 3.5 m - Concrete strength: 40 MPa 	Wang (2002)
7	Northeast Asia Trade Tower	305	68	Incheon	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile - Pile diameter: 2.0 m - Allowable bearing capacity: 32-34 MN/ea • Mat foundation - Thickness: 1.0-4.0 m (see Fig. 5b) - Concrete strength: 40 MPa 	Chung et al. (2007) Chung et al. (2008)
8	Tower Palace One, Tower B	234	66	Seoul	<ul style="list-style-type: none"> • Mat foundation - Thickness: 2.7 m (50.6 m × 43.1 m) - Concrete strength: 40 MPa 	Hong et al. (2001)
9	Haeundae I'Park Marina, Tower 1	273	66	Busan	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile - Pile diameter: 2.0 m, 2.5 m • Mat foundation - Thickness: 4.0 m - Concrete strength: 40 MPa 	Lee et al. (2012)
10	Kumho Richensia, Tower 1	241	66	Bucheon	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile - Pile diameter: 2.0 m - Pile length: 4-17 m • Mat foundation - Thickness: 2.5 m 	Kumho E&C (2010)
11	Metapolis 101	249	66	Hwaseong	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile (see Fig. 5c) - Pile diameter: 2.0 m - Allowable bearing capacity: 32 MN/ea • Mat foundation - Thickness: 3.0 m - Concrete strength: 35 MPa 	Kim (2009b)
12	Metapolis 104	247	66	Hwaseong		
13	Asan SK Pentaport Residential, Tower 3	215	66	Cheonan	Detailed information not available	
14-17	Songdo The First World, Tower 1-4	237	64	Incheon	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile - Pile diameter: 2.0 m (76 piles/building) - Pile length: 56 m - Allowable bearing capacity: 24 MN/ea • Mat foundation - Thickness: 3.3 m - Concrete strength: 35 MPa 	Baek (2016) Park et al. (2006)
18	Busan International Finance Center Landmark Tower	289	63	Busan	<ul style="list-style-type: none"> • RCD pile (see Fig. 5d) - Pile diameter: 2.5 m (60 piles) - Pile length: 15-54 m - Allowable bearing capacity: 46-56 MN/ea • Mat foundation - Thickness: 2.5-3.5 m - Concrete strength: 50 MPa 	Kim et al. (2014) Song and Lee (2012)
19	KLI 63 Building	250	60	Seoul	<ul style="list-style-type: none"> • Reinforced concrete pier foundation - Thickness: 3.0 m - Depth: 19.6 m (hard rock) 	

Table 1. (Continued)

#	Building Name	Height (m)	Floors above ground	City	Foundation type	References
20	Centum Star B	212	60	Busan	<ul style="list-style-type: none"> Mat foundation - Thickness: 3.0 m - Concrete strength: 30 MPa 	Choi et al. (2009) Jeong (2009)
-	Lotte World Tower	555	123	Seoul	<ul style="list-style-type: none"> PRD pile (fault or shear zone) - Pile diameter: 1.0 m (108 piles) - Sand cushion (0.2 m thick) between mat foundation and pile Mat foundation (see Fig. 5e) - Thickness: 6.5 m (71.7 m × 71.7 m) - Concrete strength: 50 MPa 	Lee et al. (2014) Moon et al. (2012)

Tower C [70 floors above ground]

- ▷ RCD + MAT foundation
- ▷ RCD capacity: $F_p=30\text{--}50$ MN/ea
- ▷ RCD diameter: $\Phi 2,500$ mm (101 piles)
- ▷ RCD c.t.c. distance: 5,000 mm (2.0D)
- ▷ MAT thickness: 3,500 mm

PILE TYPE	PILE CAPACITY (TON)
P1	3000
P2	3500
P3	4000
P4	4500
P5	5000

(a) Tower C in Doosan Haeundae We've the Zenith (RCD+Mat) (Kim, 2011)

(b) Northeast Asia Trade Tower (RCD+Mat) (Chung et al., 2007)

(c) Metapolis 101 (RCD+Mat) (Kim, 2009b)

(d) Busan International Finance Center (RCD+Mat) (Kim et al., 2014)

(e) Lotte World Tower (PRD+Mat) (Moon et al., 2012)

Fig. 5. Foundation Plan View of Super High-rise Buildings in South Korea

한국지반공학회는 초고층 건축물에 적용할 수 있는 강판 복합말뚝의 최적 시공방안을 검토하는 과정에서 국내 초고층 건축물 현장의 지층구조를 다음 세 가지 형태로 분류한 바 있다(Korea Geotechnical Society, 2008).

- (1) 서울지역과 같이 지하층이 많이 건설되고 굴착 심도가 깊으며, 말뚝 지반이 연암 또는 경암으로 콘크리트 타설 부분이 짧음.
- (2) 인천지역과 같이 매립층 하부에 풍화대가 고르게 발달된 지층으로 말뚝 길이가 길고 대부분의 말뚝지력이 말뚝 주변에서 발휘됨.
- (3) 부산지역과 같이 상부에 깊게 발달된 퇴적층 아래 약간의 풍화대가 존재하며 이후 연암, 경암이 발달함.

이러한 분류는 초고층 건축물의 기초 형식에 대한 조사 결과에서도 확인된다. 서울지역에서는 얇은 기초로서 주로 매트기초가 단독 적용되었으며, 부산, 인천 등에서는 매트기초와 RCD(reverse circulation drilling, 역순환굴착) 공법에 의한 말뚝기초가 함께 적용된 사례가 다수였다. 롯데월드타워의 경우에도 다른 서울지역 건축물처럼 기초하부 지반이 연암 및 경암으로 구성되어 있어 매트기초를 위한 허용지력이 충분하고 침하량도 적정한 것으로 분석(Lee et al., 2014)되었지만, 일부 파쇄대에 대한 불확실성을 제거하기 위해 PRD(percussion rotary drilling) 공법으로 코어벽체와 일부 메가기둥의 하부 지반을 파일 보강하였다. 이외에 예외 사례로서 부산 해운대 위브더제니스 A, B동의 경우 기초가 놓이는 지반이 풍화암, 연암, 경암 순서로 분포하여 전문가의 굴착 암반면 평가(face mapping) 결과에 따라 치환 후 매트기초를

시공(Park and Park, 2008)하는 것으로 계획되었다. 부산 센텀스타도 전반적으로 연암층에 위치하여 일부 풍화암과 파쇄대 구간 보강 후 매트기초를 적용(Choi et al., 2009)하였다.

3.2 국외 건축물의 기초 형식 및 제원

국외에서는 초고층 건축물의 대규모 기초 시스템으로 경제적 설계가 가능한 말뚝지반 전면기초(piled raft foundation)가 선호된다(Kim, 2009a). 말뚝지반 전면기초는 말뚝, 전면기초, 지반 세 요소가 상호 복합적으로 작용하면서 Fig. 6과 같이 침하 및 압력 저감, 말뚝 개수 및 길이 감소, 안정성 향상 등 여러 이점을 이끌어 낼 수 있다. 말뚝지반 전면기초가 적용된 대표적 사례로는 Burj Khalifa와 말레이시아 Petronas Twin Tower, 그리고 현재 건설 중인 Jeddah Tower가 있으며, 세 건축물의 기초 현황은 Table 2와 같다.

Fig. 6. Piled Raft Foundation for Sharing the Load from Super-structure (Kim et al., 2015)

Table 2. Information on the Piled Raft Foundations of World-renowned Super High-rise Buildings

Building Name	Height (m)	Floors above ground	City	Foundation type	References
Burj Khalifa	828	163	Dubai	<ul style="list-style-type: none"> Pile (192 reinforced concrete bored piles) <ul style="list-style-type: none"> Diameter: 1.5 m Length: 45 m Allowable bearing capacity: 30 MN/ea Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 3.7 m Concrete strength: 50 MPa 	Abdelrazaq (2012) Bester (2013)
Petronas Twin Tower	451.9	88	Kuala Lumpur	<ul style="list-style-type: none"> Pile (104 barrette piles) <ul style="list-style-type: none"> rectangular 1.2 m × 2.8 m Length: 60-115 m Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 4.5 m Concrete strength: 60 MPa 	Han (2009)
Jeddah Tower (under construction)	1,000	167	Jeddah	<ul style="list-style-type: none"> Pile (270 reinforced concrete bored piles) <ul style="list-style-type: none"> Diameter: 1.5 m, 1.8 m Length: 45-105 m Allowable bearing capacity: 32 MN/ea Mat foundation <ul style="list-style-type: none"> Thickness: 4.5-5.0 m Concrete strength: 85 MPa 	Leventis et al. (2015)

상기 국외 건축물은 국내 건축물보다 높은 구조물이기 때문에 전면기초의 두께와 콘크리트 강도가 각각 3.7-5.0 m, 50-85 MPa 범위로 Table 1에 제시된 국내 사례를 다소 상회하는 수준이며, 말뚝의 허용지지력은 30-32 MPa로 차이가 없다.

이러한 말뚝지지 전면기초는 1980년대 초반부터 독일 프랑크푸르트 점토지반에 세워진 고층빌딩에도 다수 적용된 바 있으며, 이 중에서 Katzenbach et al.(2000)가 정리한 10개 고층건물의 기초 형상 관련 제원(평균값 사용)을 건축물 높이에 따라 나타내면 Fig. 7과 같다. 전면기초의 두께는 1.5-4.5 m 범위에 분포하며 건축물 높이에 비례함(결정계수

$R^2=0.913$)을 명확하게 확인할 수 있다. 기초에 사용된 말뚝은 직경 0.9, 1.3, 1.5 m의 현장타설말뚝으로 설치간격은 말뚝 직경의 약 3-5배를 적용하였다. 말뚝의 길이는 기초 하부 지반 조건에 좌우되지만 대략 20-30 m 범위에서 설계되었다.

4. 국내 기초 설계 현황 분석

4.1 매트기초 특성

매트기초의 특성으로서 국내 초고층 건축물 높이에 따른 기초 두께와 콘크리트 강도를 나타내면 Fig. 8과 같다. 매트기초 두께는 2.5-4.0 m 범위(롯데월드타워 6.5 m)에 분포하며 건축물 높이와 상당한 비례관계(결정계수 $R^2=0.6083$)에 있음을 확인할 수 있다. 매트기초에 시공된 콘크리트 압축강도의 관리기준으로는 대부분 35 MPa 또는 40 MPa이 적용되었으며, 부산국제금융센터(BIFC)와 롯데월드타워 두 곳에는 50 MPa의 고강도 콘크리트가 시공되었다.

초고층 구조물의 매트기초는 동북아무역타워(Fig. 5(b))와 같이 코어벽체, 메가기둥 등 주요 구조물 하부와 그 외 영역을 구분하여 두께가 다르게 시공될 수 있으며, 롯데월드타워(Fig. 5(e))처럼 동일한 두께로 시공될 수도 있다. 그러나 갈수록 높아지는 건축물의 하중 증가로 인해 두 방식 모두 매트기초 면적이 넓어지고 두꺼워지는 추세이지만, 현장여건 상 다량의 콘크리트를 동시에 연속적으로 타설하는 데 어려움이 있다. 이러한 시공 상 제약으로 상·하층 콘크리트 간 일체성이 떨어지고 수화열로 인한 균열 발생으로 수밀성과 내구성에 문제가 생길 수 있으며, 이에 대한 대책으로 고강도, 저발열, 응결지연형 콘크리트 등 매트기초의 두께를 줄이는 한편 안전성을 높일 수 있는 기술이 개발되고 있다(Lee et al., 2012; Noh et al., 2008; Park et al., 2006).

매트기초 두께 감소는 프랑크푸르트 지역 초고층 건축물과의 비교에서도 확인된다. Fig. 8(a)에서 두 사례의 전반적인 추세는 매우 유사하지만 동일 건축물 높이에서 국내 사례의 기초 두께가 더 얇음을 알 수 있다. 이는 국내 건축물에 시공된 RCD 말뚝의 직경이 더 큰 것 외에 이러한 기술 개발에 따른 결과로 판단된다.

4.2 RCD 말뚝 특성

RCD 말뚝은 현장에서 수두차를 이용하여 공벽을 보호하면서 회전 비트로 굴착하고 이수의 역류에 의하여 토사를 배출시켜 설치하는 현장타설말뚝이다. RCD 말뚝의 제원으로는 말뚝의 허용지지력과 직경, 길이, 배치간격 등이 있으나, 기초 하부 지반과 상부 구조물 조건에 따라 길이, 배치간격이 결정되므로 본 사례연구에서는 직경과 허용지지력을 조사 대상으로 하였다. RCD 말뚝이 시공된 11개 초고층 건축물 가운데 7개소에 직경 2.0 m의 파일이 사용되었고, 2개소에 2.5 m 파일이 사용되었다. 나머지 2개소에는 직경 2.0 m, 2.5 m 두 종류가 함께 사용된 것으로 파악되었다. 말뚝의

Fig. 8. Thickness and Concrete Strength of Mat Foundations According to Building Height in South Korea (not including Lotte World Tower)

허용지지력을 보면 해운대 위브더제니스(Fig. 5(a))와 부산국제무역센터(Fig. 5(d))는 말뚝 위치에 따라 각각 30-50 MN/ea, 46-56 MN/ea 범위에서 설계되었고 그 외 건축물은 30 MN/ea를 약간 상회하거나 24 MN/ea 수준에서 설계되었다(Fig. 9).

4.3 조사 자료의 활용

2장에서 언급된 개념설계를 위한 초기 모델이나 지진 등 재난 시나리오 검토 등을 위한 가상의 대표모델이 필요한 경우에 상기 조사 자료에 근거하여 초고층 건축물의 기초를

합리적으로 구상할 수 있다. 여러 제원 중에서 매트기초의 평면 크기와 형상, 말뚝의 배치 및 길이는 상부 구조물과 지반조건에 좌우되지만, 그 밖에 주요 사항은 건축물 높이에 따라 기존 설계 범위 내에서 추정될 수 있다. 예를 들면 높이 280 m의 70층 초고층 건축물에 대한 초기 검토가 필요한 경우 Figs. 8, 9에 근거, 허용지지력 30 MN/ea로 설계된 직경 2 m의 RCD 말뚝이 암반에 관입되어 설치되고 말뚝 상부에는 콘크리트 강도 40 MPa, 두께 약 3.7 m의 매트기초가 시공된 모델(Fig. 10)을 제안할 수 있다.

Fig. 9. Distribution of Diameter and Allowable Bearing Capacity of RCD Piles in South Korea

Fig. 10. Typical Model of a Super High-rise Building Foundation for Concept Design Phase

5. 맺음말

본 사례연구에서는 기초 설계에 영향을 미치는 초고층 건축물의 특성과 일반적인 설계 절차를 소개하고, 국내 초고층 건축물의 기초 현황을 파악할 수 있도록 층수 기준 상위 21개 건축물의 기초 시공사례를 조사하였다. 국외 사례는 말뚝지지 전면기초가 적용된 유명 초고층 건축물을 살펴보고 있다. 이러한 사례 조사의 목적은 개념설계를 위한 초기모델이나 재난 시나리오 검토 등을 위한 대표모델을 구성하고자 할 때 필요한 초고층 건축물 기초 관련 정보를 제공하는 데 있으며, 합리적 범위 내에서 주요 제원의 추정이 가능함을 확인하였다. 향후에는 이러한 방식으로 구성된 대표모델을 이용하여 2장에서 제시된 주요 고려사항, 즉 수평하중의 주기적 작용, 구조물과의 공진 등이 초고층 건축물의 기초 안정성에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석할 예정이다.

한편, 초고층 건축물의 기초는 구조물의 수직하중뿐만 아니라 풍하중, 지진하중 등에 의한 거동까지 감안하여 적절한 안전율 범위에서 건축물을 지지해야 하는 매우 중요한 요소이지만, 상부구조물과 비교할 때 안전성 평가와 유지관리 기법 개발 측면에서 상대적으로 제한된 관심을 받는 분야이기도 하다. Mita(1999)는 일본 고베 대지진 후 건축물 기초의 손상 여부를 탐지하고 정량화하는데 큰 어려움이 있었음을 언급하며 효율적인 기초 모니터링 시스템 개발 필요성을 강조한 바 있다. 이에 주요 초고층 건축물 보유국으로서, 평상 시 기초 및 하부 지반 상태에 대한 신뢰성 높은 정보를 제공하고 재난 발생 시에는 기초 구조물의 건전도를 평가할 수 있는 모니터링 기법에 대한 수요도 점차 커질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT) 및 한국지질자원연구원(NP2016-055)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Abdelrazaq, A. (2012) Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of the Full Scale Structural Health Monitoring Programs. *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 1, No. 1, pp. 37-51.

Abdelrazaq, A., Poulos, H.G., Badelow, F., and Kim, S. (2011) Foundation Design and Pile Testing Program for the 151 Story Incheon Tower in a Reclamation Area. *CTBUH 2011 Seoul Conference*, pp. 361-377.

Baek, B.H. (2016) Core Technology and Quality Control

of Super High-rise Building Construction. *Proceedings of 2016 the Korean Society of Construction Legal Affairs*.

Bester, N. (2013) Concrete for High-rise Buildings: Performance Requirements, Mix Design and Construction Considerations. *Structural Concrete Properties and Practice*, pp. 1-4.

Choi, Y., Kim, S., and Lee, M. (2009) The Case Studies on Application of Mat Foundation System to Building Structure Founded on Weathered Ground. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 6, pp. 5-18.

Chung, K.R. (2003) Structural System of Hyundai Hyperion. *Structural Engineering*, Korean Structural Engineers Association, Vol. 10, No. 4, pp. 47-51.

Chung, K.R., Scott, D., Kim, D.H., Ha, I.H., and Park, K.D. (2008) Structural System of North-East Asia Trade Tower in Korea. *CBTUH 2008 8th World Congress*, pp. 1-8.

Chung, K.R., Sunu, W.I., Kim, J.H., and Lee, H.J. (2007) Structural Design of North-East Asia Trade Tower, Tilted and Tapered. *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 19, No. 2, pp. 37-43.

CTBUH (2017) from <http://ctbuh.org> (Retrieved July 3, 2017).

Earthquake Engineering Society of Korea (1999) *Seismic Design Standards of Harbor and Port*.

Han, B.S. (2009) Skyscraper Structure System and Case Study. *Daewoo Engineering Technology Report*, Vol. 25, No. 1, pp. 3-21.

Hong, G.H., Kim, W.S., Park, Y.M., and Baek, D.W. (2001) A Case of Mass Concrete for Mat Foundation in Tower Palace. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 1, pp. 31-36.

Jeong, H.M. (2009) Posco E&C the# Centum Star. *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 53, No. 8, pp. 86-91.

Jung, S. (2004) The Case Study of High Rised Habitat Building Construction-Mokdong Hyundai Hyperion. *Review of Architecture and Building Science*, Vol. 48, No. 10, pp. 82-86.

Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000) Piled Raft Foundation Projects in Germany. *Design Applications of Raft Foundations*, Edited by Hemsley, J.A., Thomas Telford, pp. 323-391.

Kim, D. (2011) Super High-rise Building Technology of Doosan Haeundae We've the Zenith. *Building Construction*, Korea Institute of Building Construction,

- Vol. 11, No. 5, pp. 23-29.
- Kim, H.T. (2009a) Understanding and Application of Piled Raft. *Hanjin Construction Technology Review*, Vol. 46, pp. 8-20.
- Kim, I.S., Kim, J.K., and Kim, D.Y. (2014) Busan International Finance Center. *Building Construction*, Vol. 14, No. 4, pp. 49-55.
- Kim, S., Hong, S., and Choi, Y. (2015) Foundation Design Practice for High-rise Buildings in Korea. *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 4, No. 4, pp. 291-310.
- Kim, S.G. (2009b) Structural Design of Hwasung Dongtan Metapolis Complex. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 9, No. 2, pp. 15-22.
- Korea Geotechnical Society (2008) *Research Report on the Present Status Analysis of Technology Applied to Steel Pipe*. Report No. KGS09-007.
- Kumho E&C (2010) Core Technology for Super High-rise Building-Bucheon Jungdong Richencia. *Building Construction*, Vol. 10, No. 5, pp. 46-58.
- Lee, J.H., Kim, J.D., and Jung, Y.G. (2014) The Structural Design of Lotte World Tower. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 5, pp. 36-41.
- Lee, J.S., Kim, K.T., and An, J.C. (2012) Concrete Technology of Haeundae I'Park. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, pp. 43-47.
- Leventis, G., Poeppl, A., and Syngros, K. (2015) From Supertall to Megatall: Analysis and Design of the Kingdom Tower Piled Raft. *The Middle East: A Selection of Written Works on Iconic Towers and Global Place-Making*, pp. 44-53.
- Martin, G.R., and Lam, I.P. (1995) Seismic Design of Pile Foundations: Structural and Geotechnical Issues. *Proceedings of Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. III, pp. 1491-1515.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014) *Enforcement Decree of the Building Act*.
- Mita, A. (1999) Emerging needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures. *Proceedings of 2nd International Workshopp on Structural Health Monitoring*, pp. 56-67.
- MOLIT (2017) *Architectural Administration Information System* (<http://www.eais.go.kr>) (accessed at May 2, 2017).
- Moon, H.J., Kim, Y.H., Kim, K.D., Lee, J.S., Seok, H.C., and Ko, J.H. (2012) Construction Example of Super Tall Building Mat Foundation for Lotte World Tower. *Building Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 31-40.
- Noh, S.K., Baek, D.H., Kwon, H.W., Bae, Y.K., Chung, S.J., and Han, C.G. (2008) Field Application of the Difference of Setting Time of Improving Super Retarding Agent of Foundation Mat Mass Concrete. *Proceedings of the Korea Institute of Building Construction Fall Conference*, Vol. 8, No. 2, pp. 57-60.
- Park, K., and Park, S. (2008) Structural Design and Analysis of Haeundae Doosan We've The Zenith. *Proceedings of the Korean Institute of Construction Engineering and Management*, pp. 93-98.
- Park, Y.K., Song, S.B., Baek, B.H., and Han, C.G. (2006) Zero-crack Construction on the Fundamental Mass Concrete using Double Bubble Sheets and Applying Low Heat Mixture. *Proceedings of the Korea Institute of Building Construction Fall Conference*, Vol. 6, No. 2, pp. 5-8.
- Poulos, H.G. (2016) Tall Building Foundations: Design Methods and Applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 1, Article No. 10, pp. 1-51.
- Song, D.B., and Lee, S.W. (2012) Structural Design of Main Building of Busan International Finance Center. *Structural Engineering*, Korean Structural Engineers Association, Vol. 19, No. 4, pp. 67-74.
- Wang, I.S. (2002) The Introduction of the High Rise Building Construction Technology and Various Concrete Development Applied to Togok-Dong Tower Palace III project. *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, pp. 703-715.

Received	October 26, 2017
Revised	October 30, 2017
Accepted	November 7, 2017