



04

롯데월드타워 구조설계 The Structural Design of Lotte World Tower

이재혁 Jae-Hyuk Lee
롯데CP 고층설계팀 팀장

김지동 Ji-Dong Kim
창민우구조컨설턴트 사장

정연기 Yeon-Gi Jung
창민우컨설턴트 소장

1. 머리말

초고층빌딩의 정의를 보면 국내건축법시행령은 50층 또는 200m 이상의 건축물, CTBUH는 300m 이상이고, 세장비가 5 이상인 건축물이라 하여 구조적인 측면에서의 초고층빌딩은 높고 세장한 건축물이라 할 수 있다. 초창기 초고층빌딩은 오피스 단일용도였으며, 콘크리트 시공기술이 덜 발달되어 앰파이어스테인트빌딩(381m)이나 윌리스타워(413m)와 같이 철골 튜블러구조로 높고 세장함을 해결하였다. 그러나 콘크리트 시공기술인 고강도콘크리트 배합설계, 펌핑(Pumping)기술, 거푸집기술(Auto Climbing System) 등이 발달되면서 중동과 아시아지역의 초고층빌딩 주요 구조물에 콘크리트가 적용되기 시작했다. 또한, 단일용도의 초고층빌딩이 복합용도로 개발되면서 외부 조망의 제약이 많은 철골 튜블러시스템 대신 아웃리저시스템이 등장하여 1994년 중국 상하이 진마오빌딩(421m)을 필두로 하여 전세계 대부분의 초고층빌딩에 적용되는 구조시스템이 되었다. <그림 1>에서 보듯이 2000년대 이후 개발된 초고층빌딩은 중동과 아시아지역에 집중되어 있고 구조시스템 또한 대부분 아웃리저시스템을 채택하고 있다.

국내 최초 500m 이상의 초고층빌딩인 롯데월드타워 또한 초기의 철골 튜블러시스템을 여러 가지 제약조건 등으로 아웃리저시스템으로 변경하였다.

2. 롯데월드타워 구조설계

2.1 개요

롯데월드타워는 지상 123층 555m 높이로 바닥구조는 철골보와 데크 슬래브, 87~104층까지 호텔 객실바닥은 두께 225~280mm의 플랫 슬래브 그리고 지상 1층을 포함한 지하층 바닥은 철근

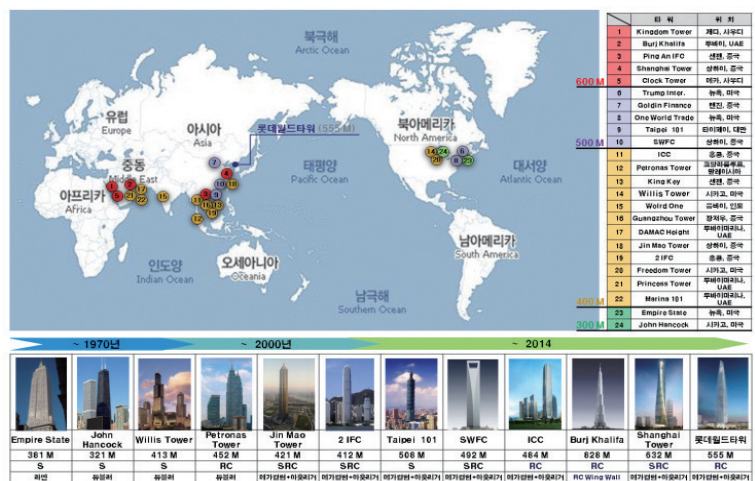


그림 1. 세계 초고층빌딩 현황

콘크리트구조로 계획하였다.

횡하중은 평면 중앙부의 RC 코어벽체, 철골 아웃리거 2개소와 8개의 RC 메가기둥 그리고 2개소의 철골 벨트 트러스로 저항하도록 계획하였다. 최상층 랜턴부는 다이어 그리드 구조로 계획하고 골조를 그대로 노출하였다.

코어벽체와 메가기둥 등 수직재 콘크리트강도는 60~80 MPa, 수평재(슬래브, 보)는 30 MPa, Mat기초는 50 MPa를 적용하였다. 콘크리트강도가 60 MPa를 초과하는 메가기둥에는 폴리믹스 섬유 혼입공법을 적용하여 폭열방지 대책을 수립하였다. 철근의 강도는 $f_y = 400$ MPa와 함께 직경 25 mm 이상 철근은 고강도 $f_y = 500$ MPa, $f_y = 600$ MPa 철근이 적용되었다. 철골 부재는 대부분 $F_y = 235$ MPa ~ 440 MPa 강도가 적용되었고, 벨트트러스와 호텔 테두리 철골기둥, 아웃리거 일부 부재는 고강도 강재인 HSA800($F_y = 650$ MPa)을 적용하였다.

오피스와 오피스텔의 층고는 각각 4.5 m, 3.9 m이며, 데크 슬래브 두께는 130 mm 및 150 mm, 바닥 철골보 촘은 각각 600 mm, 480 mm이다. 호텔(층고 : 3.6 m) 바닥은 Drop panel(두께 = 500 mm)이 있는 플랫 슬래브로 계획하였다. 메가기둥 단면은 최하층(지하 6층)에서 3.5m×3.5m이고, 66층에서 2.0m×2.0m까지 감소하며, 테두리 코어벽체 두께는 2,000 mm에서 600 mm까지 변화한다. 내부 코어벽체 두께는 500 mm, 300 mm로 계획되었다.

아웃리거트러스는 2개소로 39~44층과 72~76층에, 벨트트러스는 72~76층과 104~107층에 계획되었다.

매트기초는 전체를 6.5m 두께로 계획하였으며, 지반의 허용지지력은 3,000 kPa이다. 기초하부 지반의 일부 Fault Zone과 Shear Zone에는 지반보강파일을 시공하였다. 설계기준은 건축구조설계기준(KBC2009)을 적용하였다.

2.2 기초설계

지반조사결과 기초하부 지반은 전반적으로 연암 및 경암으로 구성되어 있어 허용지지력은 3,000 kPa로써 타워하중을 지지하기에 충분하고 침하량 또한 적절한 것으로 분석되었으나 타워하부에 일부 파쇄대가 포함

되어 지반의 불확실성에 대한 위험을 없애기 위해 108개의 지름 1.0 m PRD파일로 지반을 보강하였다. 지반 보강파일은 매트기초 침하 및 부등침하량을 감소시키고 지지력 또한 증진되도록 코어벽체 하부와 일부 메가기둥 하부에 배치되었으며, 매트기초와 분리되도록 말뚝 상부에 200 mm 두께의 Sand Cushion을 설치하였다.

매트기초는 전체를 6.5 m 동일한 두께로 계획하였으며, 토질전문가로부터 접수한 Static 지반스프링과 Dynamic 지반스프링을 적용하여 매트기초설계를 수행하였다. 수화열 제어를 위해 콘크리트강도 50 MPa의 저발열 유동화콘크리트를 적용하였다(그림 2).

2.3 횡력저항구조시스템

횡하중은 평면 중앙부의 코어벽체와 아웃리거 및 벨트트러스, 8개의 메가기둥으로 지지하도록 계획하였다. SD단계에서는 3개소의 아웃리거와 6개소의 벨트트러스로 계획하였으며, 벨트트러스는 메가기둥 사이에 있는 2개소의 철골기둥을 일정한 높이마다 지지하기 위한 역할로만 활용하였다. DD단계에서는 아웃리거와 벨트트러스가 횡변위 제어에 기여하는 비율을 평가하여 아웃리거는 2개소, 벨트트러스는 횡변위 제어에 비교적 기여율이 높은 상층부 2개소만을 횡력저항 요소로 활용하였다. 이때, 메가기둥 사이에 설치된 2개소의 철골기둥을 없애고 테두리 골조는 메가기둥 사이

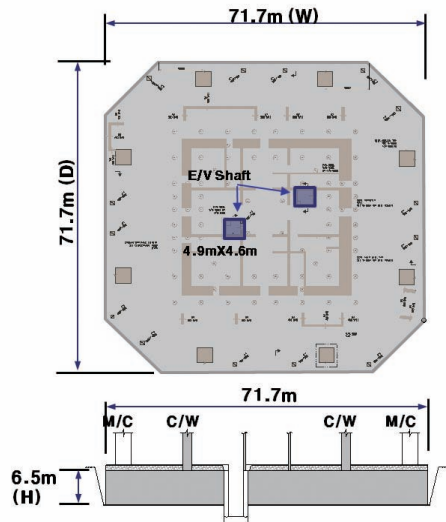


그림 2. 매트기초

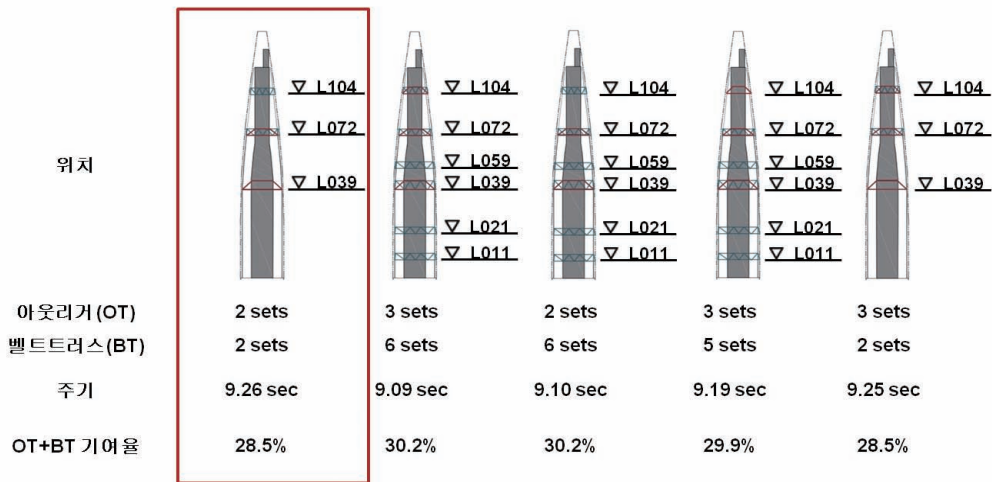


그림 3. 횡력저항구조 대안검토(DD 단계)

를 한번에 연결하는 장스팬 스펀드럴 보 시스템으로 변경하였다(그림 3).

테두리 코어벽체두께는 최하층의 2000 mm에서 600 mm까지 감소하고 ‘+’자형 코어 내부벽체 두께는 500 mm이다. 아웃리거는 2개소(39~44층과 72~76층)에 설치되며, 횡변위 제어에 대한 기여율은 약 29%로 분석되었다. 아웃리거 경사재는 철골 박스형 B-1600×500×80×20 단면이 적용되었으며, 축력을 주로 부담하기 때문에 양측의 web 두께는 80 mm로 두껍게 하고, 플랜지 두께는 20 mm로 얇게 하여 부재 제작 시 용접량이 최소화 될 수 있는 단면으로 설계되었다. 또한, 코어벽체의 수평력이 아웃리거트러스에 원활히 전달될 수 있도록 아웃리거 상·하 현재는 코어벽체 내에 매입하여 맞은편 아웃리거 트러스 수평재와 연결되도록 하였다.

아웃리거는 코어벽체와 메가기둥 사이의 부등축소에 의해 아웃리거 경사재에 발생하는 추가 부재력을 최소화하기 위하여 Delay Joint를 설치하고 최상층까지 골조공사가 완료된 이후 연결하는 것으로 계획하였다.

벨트트러스는 2개소(72~76층, 104~107층)에 3~4개층 높이의 철골 트러스로 계획되어있다. 상부 벨트트러스는 건물 최상부 랜턴구조를 지지하고, 하부 벨트트러스는 76~103층의 호텔기둥을 지지한다. 상부 벨트트러스는 건물의 횡변위 제어에도 충분히 기여하고 있으며, 해당 위치에서는 벨트트러스가 아웃리거보다 더 효율적으로 나타났다. 104층의 트러스 상·하현재는 철골 박스형 B-450×400×30×50이며, 경사재는

B-550×400×20×50 단면이 적용되었다. 아웃리거 및 벨트트러스가 설치된 층의 바닥슬래브는 Flexible Diaphragm으로 고려하여 면내 인장력, 압축력, 전단력과 중력하중에 의한 면외방향 부재력을 조합하여 Diaphragm 설계가 수행되었다.

2.4 구조물의 잉여력 확보

장스팬 스펀드럴 보, 아웃리거, 벨트트러스 및 호텔기둥 부재가 충격에 의해 1개소가 성능을 상실하거나 파괴되어도 타워가 붕괴되거나 안전성을 상실하지 않도록 Redundancy(Multi-Path)를 확보한 설계를 적용하였다(그림 4).

장스팬 스펀드럴 보와 그 접합부는 경간을 따라 임의 한 점에서 휨 성능을 상실하여도 바닥골조의 연속적인 붕괴가 발생하지 않도록 설계하였으며, 호텔기둥은 어느 1개 기둥이 파괴되어도 파괴된 기둥 상부층 기둥들은 104~107층의 벨트 트러스에 매달려 지지될 수 있

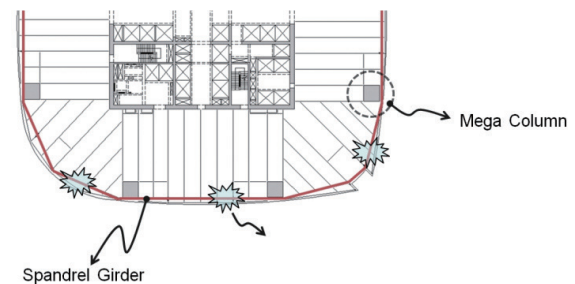


그림 4. 구조물의 Redundancy 확보 개념도

도록 설계하였다. 또한, 벨트 트러스의 부재중 어느 한 부재가 파괴되어도 호텔기둥과 랜턴하중을 지지할 수 있도록 설계하였다.

2.5 사용성 검토

바닥 진동에 대한 사용성 검토는 바닥골조의 고유진동수 제한과 AISC 'FLOOR VIBRATIONS DUE TO HUMAN ACTIVITY'에서 제안하는 최대 응답가속도를 기준으로 하였다. 율동활동이 있는 영역은 소음·진동 전문가가 제안한 9.0 Hz의 바닥골조 고유진동수를 만족하도록 하거나 방진바닥을 적용하였다.

바닥 철골보의 즉시처짐은 활하중에 대해 내부보는 SPAN/500 또한 20 mm 이하, 커튼월을 지지하는 장스팬 스패드럴 보는 SPAN/500 또한 15 mm 이하로 제어하였다(그림 5, 6).

2.6 접합부 설계

롯데월드타워의 메가기둥과 코어벽체에는 RC조가 적용되고, 대부분 층의 바닥 보와 벨트트러스, 아웃리거트러스는 철골조로 계획되어 RC와 철골이 만나는 접합부는 시공성, 공사기간, 구조안전성을 고려한 상

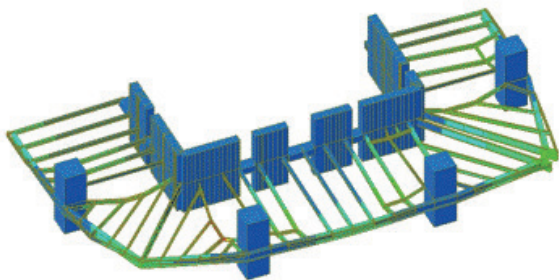


그림 5. 바닥진동에 대한 사용성 분석

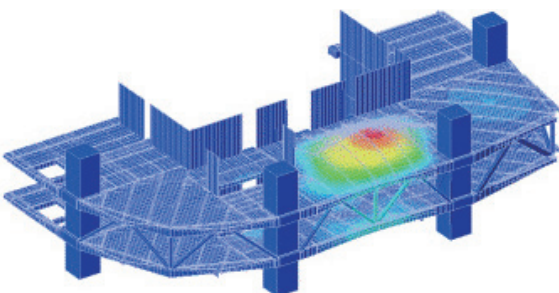


그림 6. 바닥 처짐 검토

세가 요구되었다. 장스팬 스패드럴 보와 벨트트러스는 메가기둥의 중심에 매입하지 않고 측면으로 접합하는 상세를 적용하여 시공성을 개선하고 메가기둥과 접합부의 간섭에 의한 공기지연을 최소화하였다. 관련된 상세는 국내에서는 적용사례가 거의 없었기 때문에 별도 연구를 통해 접합부에 대한 성능을 검증하였다. 아웃리거 경사재와 벽체 접합부는 양방향 아웃리거가 서로 교차되는 부분이므로 접합상세가 매우 복잡하다. 따라서 접합부는 Steel Casting과 Built-up 접합상세 2가지 방법으로 접합상세 검토가 진행되었으며, 연구 성과를 바탕으로 Built-up 접합상세를 실시설계에 적용하였다.

2.6.1 벨트트러스 접합부

호텔 기둥을 지지하고 있는 벨트트러스를 메가기둥의 외측면을 따라서 설치하면, 메가기둥은 벨트트러스 시공과 관계없이 상부로 계속 선시공할 수 있고, 호텔 철골기둥은 평면의 최외측으로 배치할 수 있기 때문에 건축적으로도 유리하다. 벨트트러스는 (그림 7)과 같이 메가기둥 외측면에 Embedded Plate를 매입 시공한 후에 선 조립된 트러스 조각을 현장용접으로 접합하도록 하였다.

벨트트러스와 메가기둥 접합부에 14.4 m 높이의 Embedded Plate는 축하중을 받을 때 발생하는 축변형을 줄이고 합리적인 다우얼바 설계를 위해 Shear Transfer Bearing Plates를 다우얼 사이에 설치하였다. 이때 파단면은 메가기둥 내부에 매입된 Bearing Plate 단부에 파단면이 형성되는 것으로 가정할 수 있다. Embedded Plate는 메가기둥 외측면에만 설치되지만 각층 바닥레벨에서는 일정 높이의 Plate로 메가기둥 전체를 감싸도록 계획하였다.

2.6.2 장스팬 스패드럴 보 접합부

스패드럴 보 역시 메가기둥의 외측면으로 연결된다. 접합부는 메가기둥의 양측면에 형성되며, Embedded Plate에 전단판을 용접하여 테두리보의 웹과 접합하도록 계획하였다. 스패드럴 보 상부 플랜지와 메가기둥 접합부는 시공 시 거더를 고정하고 메가기둥을 수평으로 지지하기 위한 것이다. 코너측은 테두리보가 꺾여서 접합되므로 접합부가 비틀림 모멘트를 부담할 수 있도

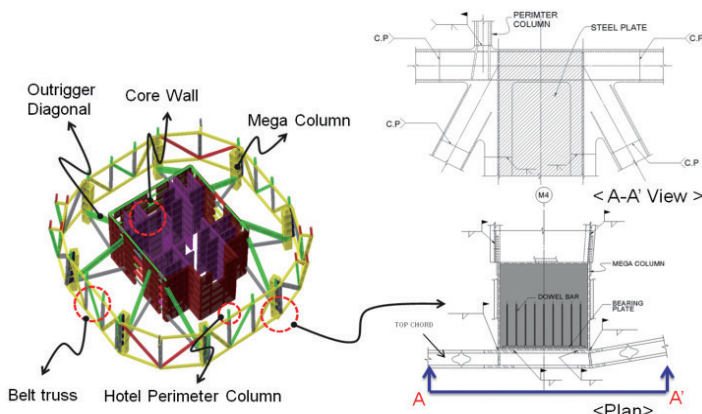


그림 7. 벨트트러스 개념도 및 상세

록 테두리보 상·하부 플랜지에 보 길이방향의 직각방향으로 Steel Plate로 보강하여 지지할 수 있도록 계획하였다. Embedded Plate는 벨트트러스 접합부 상세와 같이 Bearing Plate와 다우얼바를 함께 설치하는 것으로 계획하였다<그림 8>.

2.6.3 아웃리거 접합부

아웃리거와 메가기둥의 접합부는 기둥 내에 매입된 포스트에 아웃리거 경사재와 수평재가 연결되도록 계획하였다. 아웃리거 경사재의 수직방향 힘은 포스트 단부의 End Plate를 통해 메가기둥으로 전달되며, 수평력은 아웃리거 하현재가 부담한다. 아웃리거와 테두리 코어벽체 접합부는 <그림 9>와 같이 직각방향의 아웃리거가 서로 교차한다. 벽체에 매입된 아웃리거 경사재와 상현재는 상·하부 플랜지를 제거하여 코너부에서

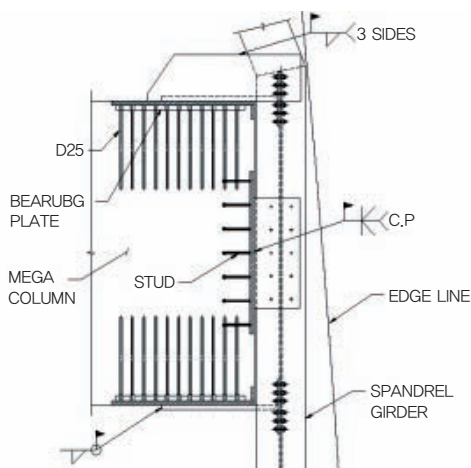


그림 8. 스펀드럴 보 - 메가기둥 접합부

벽체 수직근과 아웃리거 부재가 간섭을 줄이고, 콘크리트도 밀실하게 타설될 수 있도록 계획하였다. 벽체 코너부는 아웃리거 경사재의 수직 방향력을 지지하기 위해 수직포스트를 상·하부에 설치하였다. 경사재의 수평 방향력은 상현재가 부담한다.

3. 맺음말

2012년 실시설계 완료 이후 현재까지도 부분적인 설계변경이 진행되고 있으며, 이는 골조공사가 완료되는 2015년말까지 이

어질 대규모 복합용도 프로젝트의 일반적인 특징이라 할 수 있다. 프로젝트 단계별로 달라지겠지만 설계가 완료되고 타워공사가 50% 정도 진행된 시점에서의 롯데월드타워의 특징은 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째는 단순하고 시공성이 우수한 아웃리거 연결상세 제안이다. 대부분의 초고층타워의 아웃리거 접합부는 메가기둥부에 위치하여 골조완료 시까지 Shim Plate와 유압잭을 이용한 Gap 조정작업을 지속적으로 진행해야 하는 어려움이 있으나 이를 코어부 근처에 Delay Joint를 설치하는 것으로 해결하였으며, 공사단계별 아웃리거 상세설계와 부등축소량 검증을 통해 지속적으로 안전성확인을 수행하고 있다.

둘째는 21만 m³의 콘크리트, 34,600 ton의 철근 그리고 43,000 ton의 철골이 투입된 구조체라는 것이다. 골조 자중만 58 만ton이 넘고 완공 이후 활하중을 포함하면 약 75 만ton이 된다. 주로 바닥구조에 적용한 철골물량이 160 kgf/m²으로 조금 많은 이유는 벨트트

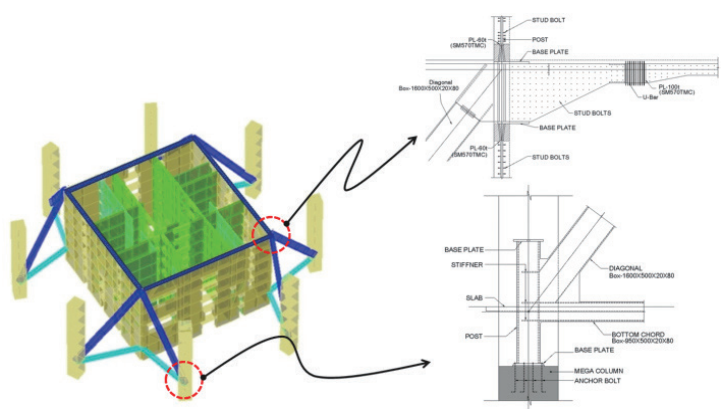



그림 9. 아웃리거 개념도 및 상세

리스 개소를 최소화하기 위해 매 층 바닥중을 메가 기둥으로 전달하는 스패드럴거더 형식을 도입했기 때문이다.

셋째는 고강도 고성능 신자재의 도입이다. 매트공사를 위한 저발열콘크리트, 메가기둥 철근공사를 위한 SD600 HD51 나선형철근, 철골공사 시공성 및 공사비 절감을 위해 HSA800 강종 및 F13T 볼트 등을 설계에 반영하고 현재 공사가 진행 중이다.

넷째는 롯데월드타워는 공사단계에서 약 500여개의 계측기를 설치하고 데이터를 축적하고 있다는 것이다. 지반침하량 계측, 버티컬쇼트닝 계측, 공사중 수직도 계측 및 SHM 시스템용 계측 등을 위한 다양한 계측기가 현재 설치가 진행되고 설치된 계측기는 정기적으로 데이터를 계측하여 자료로 축적하고 있다. 앞으로 공사 중 및 완공 이후 확보되는 롯데월드타워의 각종 데이터 들은 추후 초고층타워의 거동을 파악할 수 있는 중요한 자료로 활용될 것이다. 

담당 편집위원 : 김재요(광운대학교) kimjyo@kw.ac.kr



이재혁 팀장은 인하대학교 건축공학에서 석사학위를 취득하고 (주)전우구조와 (주)한미글로벌에서 근무한 경력이 있으며 현재 롯데CP프로젝트 총괄에서 롯데월드타워 설계팀장을 역임하고 있다.

lihue@lotte.net



김지동 사장은 경희대학교 건축공학과를 졸업한 후, 1991년 (주)창민우구조건설탄트에 입사하여 현재 대표이사로 재직하고 있다. 주요 수행 프로젝트로는 SK-T타워, 인천여객터미널 2단계사업, 송도 포스코사옥, 여의도 서울국제금융센터, 잠실롯데월드타워 구조설계등이 있다.

jdkim@minwoo21.com



정연기 소장은 울산대학교 건축공학과를 졸업한 후, 1998년 (주)창민우구조건설탄트에 입사하여 현재 이사로 재직하고 있으며, 건대 the#StarCity, 화성동탄 메타폴리스, 잠실롯데월드타워 구조설계를 수행하였다.

ykjung@minwoo21.com

▲ 학회지광고 게재 안내 ▲

콘크리트학회지는 격월간으로 발행되어 8,000여 회원을 비롯한 콘크리트 관련 업계, 학계, 유관 기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다.

귀사의 미래를 위한 광고가 저렴한 가격과 가장 효과적인 방법으로 활용될 수 있도록 광고를 모집합니다.

1. 광고게재면

게재면	광고 협찬금	게재면	광고 협찬금
표 2	80만원	간지	70만원
표 3	70만원	내지(전면)	50만원
표 4	100만원	박스 광고	30만원

2. 할인혜택 : 우리 학회의 특별회원사가 게재하는 광고 또는 연간 6회 이상 게재 시 상기 협찬금을 아래와 같이 할인하여 드립니다.

단, 일시불로 납부하여야 적용 가능합니다.

1년 계약 : 10% 할인 2년 계약 : 20% 할인 회원사 : 추가 5% 할인