

중국 베이징에 위치한 CCTV 본부

(CCTV Headquarters, Beijing, China)

구조 설계와 승인

Structural engineering design and approvals



김종수*
Kim, Jong-soo



김인호**
Kim, In-ho

이 기사는 OAP의 2005년 2월 The Arup Journal 에 게재된 내용을 OAP한국지사의 하승윤지사장과의 협의를 거쳐 국내에 널리 소개하는 의미에서 번역된 기사이다.

Chris Carroll, Paul Cross, Xianian Duan, Craig Gibbons, Goman Ho, Michael Kwok, Richard Lawson, Alexis Lee, Andrew Luong, Rory McGowan, Chas Pope

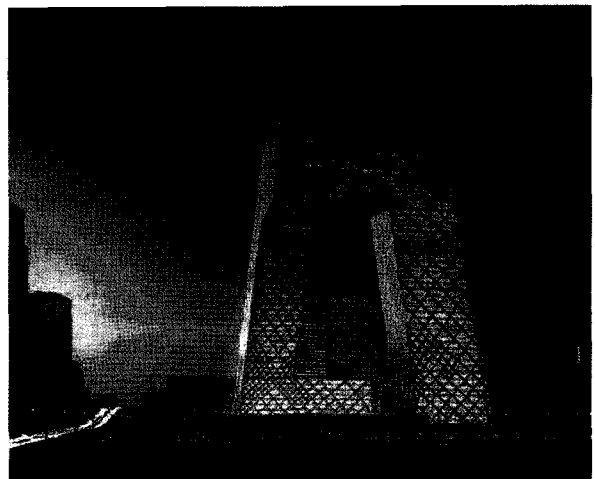
1. 서론(Introduction)

중국은 역사적으로 유례가 없이 빠른 속도로 성장하고 있다. 현재 13개 채널을 가지고 있는 중국 중앙방송공사(CCTV)는 2008년까지 200개 이상의 채널을 운영하고 국제시장에서 CNN, NBC, sky, BBC 등과 함께 성공적으로 경쟁할 계획을 세우고 있다. 이러한 계획을 성취하고 국제적 인지도를 확보하기 위해서 전체 방송제작 과정이 한 장소에 통합된 새로운 본부 시설이 요구되고 있다. 대지는 베이징에서 중앙 상업지구로 새롭게 지정된 곳에 있다<그림 1>.

2002년 초, CCTV는 국제 현상설계를 공모하여 많은 대형 설계사무소들의 관심을 끌었다. 2002년 8월

* 한국셀 · 공간구조학회 회장, (주)CS구조엔지니어링 대표 이사/건축구조기술사

** 정회원, (주)CS구조엔지니어링 과장/공학박사



<그림 1> CCTV in the new Beijing CBD.

새롭게 지정된 베이징 중앙상업지구의 CCTV

용모 작품들 중, 로테르담(Rotterdam)에 사무실을 두고 Arup과 함께 작업한 램 쿨하스(Rem Koolhaas)의 OMA(Office for Metropolitan Architecture) 설계안

이 당선되었다. OMA는 프로젝트를 빈틈없이 수행하기 위해, 설계와 구조에 대해 공식 '설계 협회(LDI : local design institute)' 역할을 하는 ECADI(East China Architecture and Design Institute)와 협력하였다. 중국에서 수행되는 모든 프로젝트에 대해, 법륜적으로 LDI와 공동작업하는 것이 필수이고, LDI의 지식과 LDI와의 협력은 프로젝트에 많은 도움을 준다.

"누가 구조는 재창안(reinvent)되서는 안 된다고 했나?... 누가 구조를 재창안하는 것이 창조적이지 아니라고 하나?"

〈램 콜라스 2003년 8월 5일 청화대학 토론에서〉

설계팀(The Design Team)

SD(schematic design)가 시작될 때, 프로젝트는 홍콩과 런던에 있는 Arup 사무소들에 각각 분할되었다. 홍콩에서 6명, 베이징에서 1명의 직원을 지원하여, 총괄팀을 로테르담에 가까운 런던에 배치하였다. 관련된 공학분야가 많고 대지 내 3개의 건물에 전담 프로젝트팀이 각각 배치되어야 하기 때문에, Arup은 OMA사무소에 상주하였다. EPD(extended preliminary design) 단계를 진행시키기 위해, 4명의 ECADI 엔지니어들이 런던에 있는 Arup팀에 합류하고 다른 한편으로 건축가들이 로테르담에 있는 OMA과 함께 작업하였다.

홍콩에 있는 다른 Arup팀은 중국 내에서의 건물 설계와 절차에 대한 정보와 지침을 제공하고 관계 당국과 건축주에 접촉하였으며, 풍공학과 화재공학과 같은 전문분야에 대한 자료를 제공하였다. 설계 과정이 진행됨에 따라 베이징과 선전의 Arup 사무소에서 추가적인 자료가 제공되었다.

이러한 친밀한 협력을 통해, 4개월 만에 SD를 마치고 이후 6개월 안에 EPD를 완료하고 '전문가위원회'의 검토(EPR : Expert Panel Review)와 승인을 받을 수 있었다.

Arup은 SD와 EPD 단계동안 공학 설계를 주도하며 ECADI 엔지니어와 공동작업하였고, 구조, 건물 서비스, 지질공학, 통신장비, 안전 설계에 대한 공학 지식과 상담에 대한 자료들을 제공했다. ECADI는 현

재 최종 시공정보를 만들고 현장에 Arup으로부터 지원받아 현장지원을 하고 있다.

설계 개념(Architectural Concept)

건축주는 현상설계 공모 개요에서 모든 시설들은 한 건물은 아니더라도 반드시 한 대지에 배치되어야 한다는 것을 명문화하였다. 이에 대해, OMA는 TV프로그램 제작과 같이 복합적이고 분할된 작업과정에서 형성되기 쉬운 '계도1)'를 극복하고, 3차원적 배치를 통해 사용자들, 즉 창조적 작업을 하는 프로듀서, 기술자, 관리자로 하여금 보다 좋은 최종결과물을 경제적이고 효율적으로 산출할 수 있게 유도하는 것이 가능해야 한다고 결정했다.

따라서, 설계안은 관리와 일반사무, 뉴스와 방송, 프로그램 제작과 서비스의 모든 과정들을 서로 연결된 하나의 활동반경 안에 조합하였다. 구조 상세는 건물 상세에 따라 진화하고, 반대로 건물 상세는 구조 상세에 따라 진화하였다. 주목할 만한 예로서, '타워(Tower)'와 '베이스(Base)'에 있는 2개 층 스튜디오는 건물의 구조적 형태에 큰 영향을 주었다.

프로젝트에 포함된 공공시설은 두 번째 건물인 TVCC(Television Cultural Centre)에 위치하고 있다. 두 건물들은 주요 설비와 시설물 보안 기능을 하는 하나의 지원 건물로부터 각종 서비스 기능을 제공받고 있다.

착공까지의 과정(Progress to Construction)

전례가 없을 정도로 도전적인 설계안의 특성으로 인해, 상당 기간동안 설계안의 타당성을 설득하는 시간이 필요했고 그 기간동안 Arup은 프로젝트의 리스크를 줄이기 위해 상당한 노력을 했다. 다음 4개월 동안 타당성 조사가 수행되었고, 건축주의 기술고문과 Arup팀의 핵심 팀원들 간 설계개념 검증을 위해 2번의 회의가 있었다. 이러한 과정을 통해, 안전성, 시공성, 설계안의 견적에 대한 이슈

1) 유대교도들을 강제 격리시켰던 일정한 거주지역. 이것을 일반화하여 소수자 집단의 밀집거주지역에 대해서 사용하는 경우도 있다.

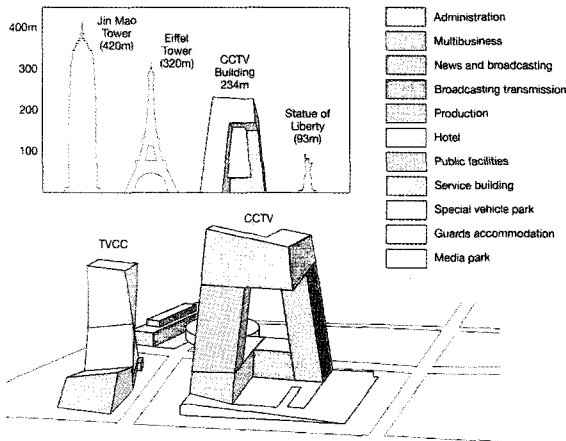
들이 소개되고 지금까지 전례가 없지만 건물이 성공적으로 세워질 수 있다고 결론을 내렸다. 건축주가 이러한 내용을 확인한 후 계약이 체결되었고, 프로젝트를 수행하기 위해 국제적으로 결성된 설계팀이 작업을 시작했다. 공식적인 기공식은 2004년 9월 22일에 거행되었다. 공사가 최근에 시작되어 완공까지는 3년 이상이 걸리지만, 새로운 CCTV 본부의 환상적인 이야기는 지금부터 시작된다고 할 수 있다. 본 기사는 주로 CCTV본부 건물의 구조설계, 해석, 허가 과정을 다루었다. Arup저널의 다음 판에서는 CCTV본부 건물의 설비시설과 안전공학, TVCC와 부속건물, 그리고 완공까지의 시공과정에

대해 다룰 것이다.

새로운 CCTV 본부(The New CCTV Headquarters Development)

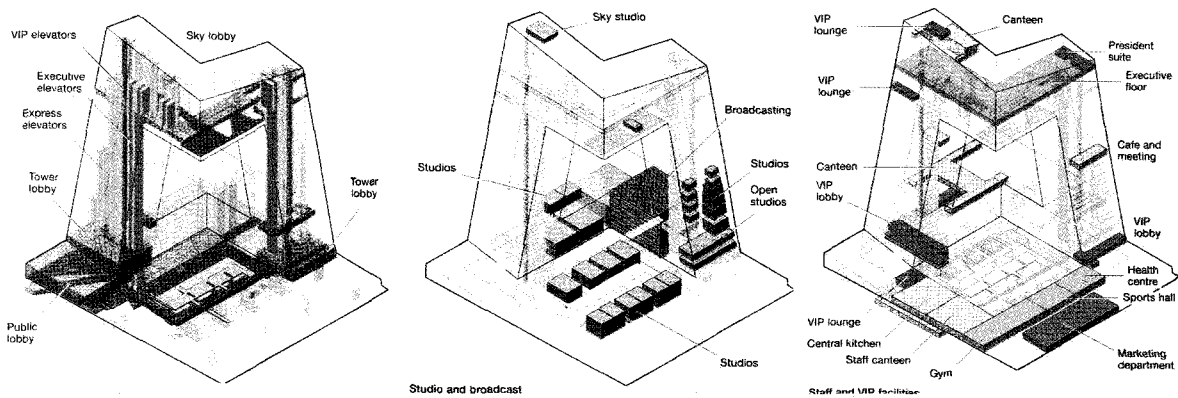
전체 CCTV 개발 프로젝트는 대지면적 187,000m²에 연면적 550,000m²를 제공할 예정이다. 예상되는 건설비는 약 50억 RMB²⁾(6억 달러)이고 전체 프로젝트<그림 2>는 다음과 같은 시설들을 포함한다.

- CCTV 본부 건물
- TVCC
- 부속 건물
- 조경과 지형물을 갖춘 미디어 공원



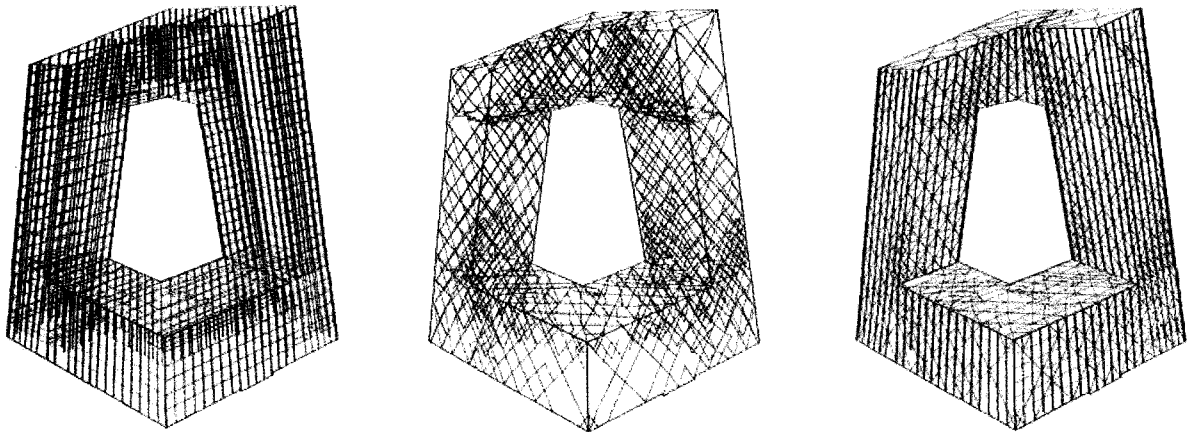
<그림 2> The site layout, showing programme distribution
건물배치 및 공간계획

연면적 450,000m², 높이 234m의 CCTV 건물<그림 3>은 9층의 '베이스(Base)'와 3층의 지하층, 각 방향으로 6°기울어진 2개의 '타워(Tower)', 9~13층으로 된 '오버행(Overhang)', 36층의 열린 공간으로 구성된 '연속 튜브(continuous tube)'를 형성한다. 다른 관점에서 보면, 전체 건물 형태는 4개의 독립적 입체로 볼 수 있으며, 각각의 크기는 런던의 Canary Wharf 건물의 One Canada Square의 크기와 비슷하다. 이들 중 둘은 대지의 반대편 모서리에서 서로 기대어서, 위와 아래에서 가운데가 90°로



<그림 3> The functions and layout with in the CCTV building
CCTV 건물의 기능 및 배치

2) 중국화폐의 일종으로 '인민폐'라고 불리고 발음은 '렌민비'이다. 1RMB=133 WON



〈그림 4〉 Principles of the tube structure: regular grid of columns and edge beams + patterned diagonal bracing = braced tube system.

튜브구조의 원리 : 등간격 격자로 배치된 기둥과 테두리보 패턴화된 대각가새 = 가새튜브시스템

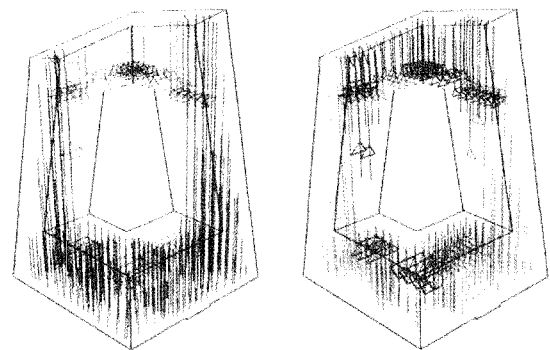
꺾인 다른 두개의 수평 입체에 의해 결합되어 있다.

구조 형태(Structural Form)

슈퍼구조-‘연속 튜브’(Superstructure-the ‘Continuous Tube’)

일찍부터, 설계팀은 CCTV 건물의 건축형태를 해결할 유일한 방법으로 ‘완전 파사드 구조(entire facade structure)’ 즉, 본질적으로 외부 ‘연속 튜브’를 사용하는 것을 결정했었다. 이런 구조를 사용함으로써, 극심한 지진하중 및 풍하중뿐만 아니라 L자형 부분과 기울어진 부분에서 발생하는 거대한 응력에 저항할 수 있는 부재 배치와 부재 크기가 필요하였다.

이 ‘튜브’는 건물의 모든 면들을 가새보강함으로써 형성된다<그림 4>. 가새 면은 모서리를 보강하기 위해 건물의 모든 면들에 걸쳐 연속적이다. 연속 튜브 시스템은 건물에 작용하는 단기, 장기 하중의 특성과 강도에 저항하는 데 이상적인 구조다. 또한, 타워간의 휨과 비틀림을 제어하고 ‘베이스’에 하중을 전달하기 충분한 강도와 강성을 타워에 제공해주고, 베이스가 타워 아랫부분을 보강하여 주어진 건물 형상에 대해 하중이 가장 효율적인 분포로 기초에 전달될 수 있게 하는 다목적이고 효율적인 구조이다.



(a)

(b)

〈그림 5〉

(a) Internal columns starting from pilecap level
파일캡에서부터 시작된 내부기둥

(b) Internal columns supported on transfer structures
트랜스퍼 구조에 지지된 내부기둥

트랜스퍼 구조에 지지된 내부기둥

엘리베이터, 계단, 수직 배관 등이 위치한 수직 코어가 기울어진 ‘타워’의 바닥판 면내에 항상 위치하기 위해서는 기울어져야 한다. 바닥판 평면을 일관성 있게 배치하기 위해 코어를 기울이는 방법을 고려하였지만 엘리베이터 시스템 설치가 제약되어 배제되었다.

‘타워’의 바닥판들은 많은 수직 기둥들에 의해 지지된다. 기울어진 ‘타워’의 속성상, 수직 기둥 선을 바닥에서 최상층까지 연속으로 배치하기가 어려워 2

개 층의 깊은 '트랜스퍼 트러스 시스템(transfer truss system)'이 대략 '타워'의 중간정도에 해당되는 층에 사용되었다. '오버행'의 바닥판은 두개 층의 깊은 '트랜스퍼 데크(transfer deck)'를 통해 외부 튜브 구조에 연결된 수직 기둥에 의해 지지된다<그림 5>.

'연속튜브' 구조는 언뜻 보기에 비정형적인 배치인 것처럼 보이지만, 두개 층에 걸친 철골 혹은 SRC기둥, 보, 대각 철골가새들로 구성된 정형적인 기본 패턴을 가지고 있다. 가새를 추가 혹은 제거시키고 설계 요구강도 및 강성에 적합하도록 가새 판 두께를 변화시켜, 정형적인 기본 패턴을 조정하고 최적화하였다.

2개 층으로 된 기본 패턴을 '타워'안의 2개 층 높이의 여러 스튜디오들의 위치와 일치되게 배치하였다. 바닥판 다이어그램은 매 2개 층마다 배치되어 있어서 중간층에 가해지는 힘은 내부코어와 기둥을 통해 각각 위와 아래의 다이어그램들로 전달된다.

가새튜브 구조는 시공기간 동안 기울어진 '타워'들에 충분한 강성을 제공하여, 마지막에 '타워'들이 연결되어 서로 지지할 수 있게 되기 전까지 큰 오차 없이 안전하게 시공될 수 있게 한다. 튜브 시스템은 '오버행'의 시공에도 적합한데, 이는 '오버행'이 시공기간 동안 '타워'들로부터 일시적으로 두 개의 반절 캔틸레버들로서 돌출되어야 하기 때문이다.

강건성(Robustness)

연속 튜브는 높은 수준의 강건성과 고차의 부정정성을 확보하고 있어 주요 부재들이 제거되는 우발적인 상황에도 대체가능한 하중 경로를 확보할 수 있는 잠재성을 제공한다. 이러한 특성들에 대해 상세한 연구가 진행되었으며 이를 통해 건물에 보다 높은 수준의 안전성을 제공하게 된다.

서브구조와 기초(Substructure and Foundations)

'타워'는 온통파일 기초(piled raft foundation)로 지지된다. 파일은 지름이 1.2m, 길이가 약 52m이다. 지반으로 전달되는 힘의 크기와 분포에 따라 기초는 두께가 7.5m에 달하는 곳도 있으며, 지반으로 하중을 보다 효율적으로 분산시키기 위해 발가

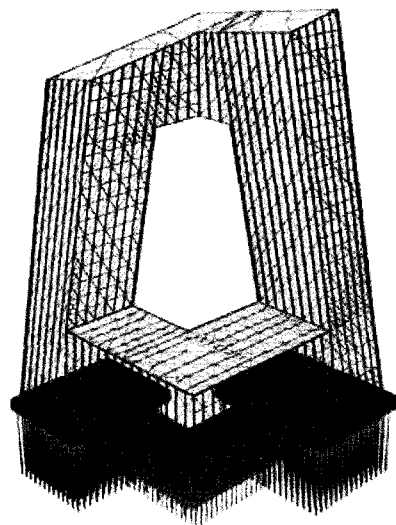
락처럼 작용하도록 타워의 바닥판을 확장하였다. 기초 시스템은 기초판의 중심이 각 타워의 바닥에 작용하는 하중 중심에 가깝도록 배치하여 파일에 인장력이 작용하지 않도록 하였다. 주요 지진에 대해서 단지 몇몇 파일들에만 제한적으로 인장력이 작용할 뿐이다.

'베이스'와 3층의 지하층에 대해서, 전통적인 온통 기초(raft foundation)가 사용되었고 기둥 사이의 인장 파일은 깊은 지하층에 작용하는 수압에 견딜 수 있도록 설계되었다. 길이 15~20m, 지름 600mm의 인장 파일이 기초아래 배치되고, 스튜디오 아래 커다란 '트랜스퍼 트러스'를 지지하는 2차 코어와 기둥아래에 지름 1.2m의 파일을 추가적으로 배치하였다<그림 6>.

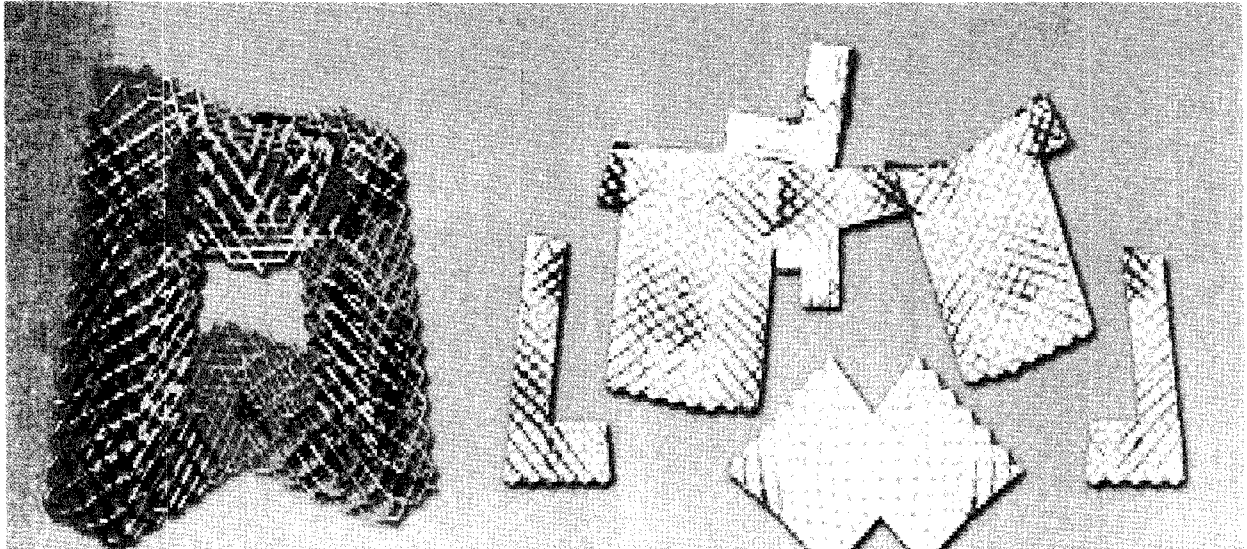
가새 패턴의 개발과 최적화(Developing and Optimizing the Bracing Pattern)

'연속튜브' 구조체 안의 대각 가새는 시각적으로 구조체 안의 힘의 패턴을 표현하고, 창호(cladding) 시스템의 중요한 미학적 요소를 결정한다. 가새 패턴은 건축가와의 공동작업과 강도 높은 반복적인 해석 작업을 통해 결정되었다.

건물의 주요구조는 Oasys GSA에서 모델링되었

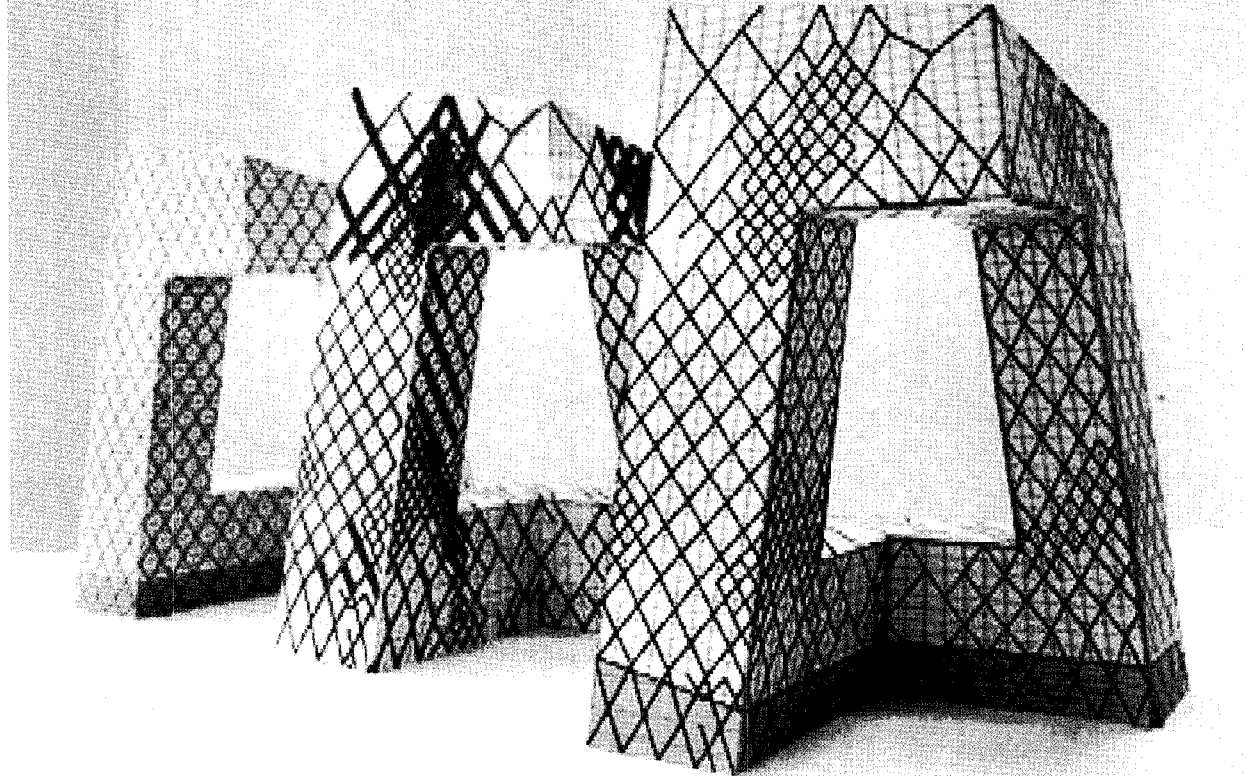


<그림 6> The foundation system 기초시스템



〈그림 7〉 Brace stresses for a uniform grid
 등간격 그리드에 대한 가새
 응력분포

〈그림 8〉 Unfolded view of the structure, showing
 areas to densify or rarefy the mesh
 메쉬를 촘촘하게 하거나 듥성듬성하게 할 부분을 보여
 주는 구조체의 전개도



〈그림 9〉 Models illustrating the development of the facade pattern
 파사드 패턴발전안을 보여주는 3차원 모델

고 레벨1의 지진에 대한 등가정적하중을 포함하는 전형적인 하중이 적용되었다. 초기에 등분포 가새 패턴<그림 7>이 가정되어 SRC기둥과 철골 기둥의 크기가 적절히 정해졌다. 가새 안의 힘의 분포에

대해 면밀하게 조사하고, 가새들을 결과적으로 3개의 그룹으로 분류하고 각 그룹에 속한 가새에 다음과 같은 조치가 취하였다.

- 가새를 추가하여 매쉬를 촘촘하게 하라 : 가새를 두 배로 늘리기
- 매쉬를 유지하라
- 가새를 제거하여 매쉬를 듽성듬성하게 하라 : 가새를 반으로 줄이기

구조체는 고차 부정정 구조이기 때문에, 가새 패턴을 변화시키면 기둥, 가새, 테두리 보에 새롭게 힘을 분포시키게 된다. 강성 변화는 구조체의 동적 거동, 즉 지진하중을 변화시킨다. 결국, 패턴을 만드는 작업은 지극히 복합적인 반복 과정이 된다.

전개된 구조체<그림 8>와 3차원 모델<그림 9>에 표현된 응력 패턴은 건물 전체의 응력 패턴을 한 번에 명확히 파악할 수 있게 해준다. 이를 통해, 설계팀은 패턴을 시각적으로 생성하고, 건축가에게 패턴에 대한 정보를 즉시 제공하여 패턴 개발에 관여할 수 있게 한다.

성능기반 설계법(A Performance-Based Design)

중국 승인 과정(Chinese approvals process)

중국에서의 건물설계 실무에 관련된 법률체제는, 설계기준이 정부에서 결정되고 출판되는 일본을 비롯한 몇몇 유럽국가와 유사하다. 설계 엔지니어는 규준에 정한 업무범위 내의 건물과 구조체를 설계할 때에는 규준을 따라야 한다. 반면, 규준은 규준을 준수하는 설계 엔지니어에게 법률적 보호를 해준다. 건물의 내진설계에 대한 중국 규준(GB50011 - 2001)은 적용범위, 다양한 시스템들에 대한 높이 제한, 평면 비정형성과 수직 비정형성 등에 대해 정의하였다. 규준의 적용범위를 벗어나는 건물의 설계는 건설부에서 고시하는 프로젝트 내진설계 전문가위원회의 검토와 승인 과정을 거쳐야 한다.

베이징에서 높이 234m의 CCTV 건물은 철골튜브 시스템(골조-튜브, 겹침-튜브(tube in tube), 트러스-튜브 등)의 제한높이 260m 보다 작지만, 건물 형상이 규준을 벗어난다. 베이징 시당국의 내진설계 관리부서는 12명의 유명 중국 엔지니어와 교수

들을 전문가 위원회로 위촉하여, 내진강도, 내진 구조손상 제어, 인명 안전성 등의 측면에 대해 초점을 맞춰서 구조설계를 면밀히 검토하게 되었다.

Arup은 설계단계 초기부터 전문가위원회(EP : expert panel)를 참여시키는 것이 중요하다고 생각하여, 세 번의 비공식적 회의를 통해 피드백을 요청하고 최종 공식발표 전에 신뢰를 얻었다. 전문가위원회는 많은 일반인과 정부의 감독 하에 Arup의 설계안을 면밀히 검토하였고, 이런 과정에서 매우 중요한 역할을 했던 설계안의 정밀성 부분에 대해서 ECADI와의 성공적인 공동작업을 통해 많은 도움을 받았다. 첫날부터 건물은 중국 내에서의 커다란 관심을 받게 되었고 일반 대중과 정부는 설계안의 안전성에 대해 우려하였다. 실제로 설계안은 대중과 언론에 의해 감독의 척도인 'Wei-Fang(위험한 건물)'로 인식되었고, 프로젝트와 Arup은 'Wei-Fang'로서 감독되었다.

내진설계 조건(Seismic Requirements)

내진설계는 중국규준의 적용범위에서 벗어나 있어, 초기부터 Arup은 성능기반 설계법을 제안하였다. 성능기반 설계법은 서로 다른 레벨의 지진하중들에 각각 해당하는 성능목표들을 정하고 이를 성취하기 위해서 각각의 기본 원칙, 최신 방법, 지침 등을 채택한 설계법이다. 3개의 설계지진 레벨에 대한 성능을 확인하기 위해, 적절한 선형/비선형 지진 해석을 사용하여 명확하고 정량적으로 설계 검토가 이루어졌다.

건축주와 정부 모두에게 건물의 중요성을 반영하기 위해, Arup 설계팀은 전문가위원회의 조언을 받아 성능기반 설계에 대한 기준을 결정했는데 이는 중국 내의 비슷한 건물에 적용되는 기준들보다 엄격하였다. 기본 정성적 성능목표들은 다음과 같다.

- 50년 평균 재현주기의 레벨1 지진 하에서 구조적 손상 없음(50년 내 63% 초과확률)
- 475년 평균 재현주기의 레벨2 지진 하에서 수리가능한 구조적 손상(50년 내 10% 초과확률)
- 2500년 평균 재현주기의 레벨3 지진 하에서 심각한 구조적 손상 허용되나 붕괴 방지(50년 내

2% 초과확률)

CCTV개발 부지에서, 3개의 설계지진 레벨들에 상응하는 최대 수평 지반가속도 값은 각각 중력가속도의 7%, 20%, 40%이다.

탄성 슈퍼구조 설계(Elastic Superstructure design)

초기 개념작업에서 가새 패턴이 결정되어, 레벨1의 지진을 포함하는 하중조합에 대해 모든 선형 탄성해석들이 수행되었다. 레벨1의 지진에 대해서는 모달 응답스펙트럼 해석이 사용되었다. 모든 요소들이 폭넓게 검토되어 건물의 전체 성능이 검증되었다. 선택된 요소들은 초기에 레벨2의 지진에 대해 탄성해석으로 평가되어, 기둥과 같은 주요 부재들이 탄성상태로 유지되는 것이 확인되었다.

탄성해석과 설계는 주로 SAP2000과 중국 철골 표준 후처리기(post processor)를 사용하여 수행되었다. 후처리 모듈(post processor)은 자동적으로 건물에 적용되는 개별 하중케이스(load case)들을 생성하고 한계상태 설계를 위한 하중조합을 생성한다. 각 부재에 대해 결정적(critical) 케이스에 대해 상세하게 검토할 수 있도록 용량 비율(capacity ratio)을 시각적으로 표현한다. 모델내의 방대한 부재개수 - 거의 90,000m에 달하는 철골과 SRC단면을 표현하는 10,060개의 요소- 와 수많은 하중케이스들로 인해, 철골기둥, SRC기둥, 가새, 연속 튜브를 형성하는 테두리보에 대해 각각 4개의 후처리기들이 동시에 작동되었다. SRC기둥은 철골 표준과 SRC기준 간의 차이를 고려하여 이를 반영하도록 수정된 후처리기를 사용했다. 이러한 기둥들의 단면의 물성 값은 이후 비선형 해석 작업에서의 단면 물성 값도 생성해주는 XTract을 사용하였다.

후처리기는 개정된 요소 리스트를 생성하여 다시 SAP2000으로 보내주었고 설계기준이 충족될 때까지 해석과 후처리 작업이 반복되었다. 구조체가 높은 부정정 구조이고 하중 경로가 강성에 의해 많은 영향을 받기 때문에, 요소 물성의 작은 변화가 지역적으로 하중을 변경시킨다. 용량(capacity)에

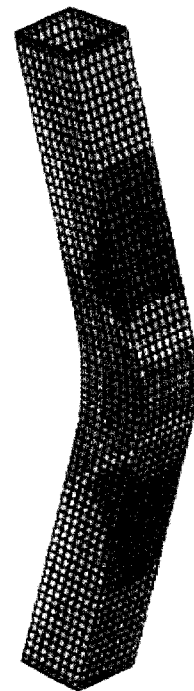
대해서만 요소를 최적화하는 것은 전체 하중을 점차로 안쪽 코너 기둥에 집중시키고 부재를 크게 만들 수 있다. 따라서 요소단면의 크기를 줄일 수 있지만 뒷면의 튜브 강성을 유지하기 필요한 최소크기가 존재할 경우 주의 깊은 관리가 필요하다.

다방향 모달 응답스펙트럼 해석을 깊이 검증하기 위해, 실제 지진기록과 인공 지진하중을 사용하여 레벨1의 지진하중에 대해 시간이력 해석에 대한 검증이 이루어졌다.

소프트웨어(Software)

CCTV프로젝트 구조설계를 위해 많은 소프트웨어 패키지들이 사용되었다. 그 중은 몇몇은 Arup의 사내에서 개발되었다<그림 10>.

CSI SAP2000 : 정적, 동적, 푸쉬오버(push-over) 기능을 포함한 제한된 비선형 구조해석 및 설계



<그림 10> Non-linear finite element simulation model showing local buckling of a typical steel brace

일반철골가새의 국부좌굴을 보여주는 비선형 유한요소 시뮬레이션 모델

Oasys LS-DYNA Environment : 비선형 시간이력 해석

Oasys GSA : 정적, 응답스펙트럼 동적 기능을 포함한 선형 구조해석

Oasys Vdisp : 비선형 지반강성을 해석하기 위한 GSA 플러그인

Oasys GSRaft : 반복적 비선형 지반-구조 상호작용 해석

Oasys Compos : 복합 철골보와 콘크리트 슬라브의 해석 및 설계

Oasys Adsec : 복합(SRC) 단면 해석

Oasys ADC : 철근 콘크리트 설계 패키지

Xtract : 비선형 거대 변형도 복합(SRC) 단면 해석

MSC/Nastran : 유한요소 해석 패키지

Xsteel : 3차원 CAD 패키지

비선형 슈퍼구조 내진설계와 성능 검증(Non-linear Superstructure Seismic Design and Performance Verification)

성능기반 설계에 대해, 내진 성능 목표를 성취하기 위한 '로드맵(roadmap)'을 생성하기 위해서 설계팀이 프로젝트 '설계 지침'을 제안하고 전문가위원회에서 검토하고 승인하였다. 선형/비선형 지진응답 시뮬레이션법이 선택되어 3개 레벨의 설계지진들에 대해 건물의 성능을 검증하였다. 3개의 정성적 성능 목표들이 성취되는 것을 면밀히 검토하기 위해, 지진력과 변형 요구량(deformation demand)은 이전에 정해진 수용 한계치(acceptance limit)들과 비교되었다.

연속튜브 내의 주요 구조가새 부재에 대한 비탄성 변형 수용 한계치는 좌굴 후 거동에 대한 비선형 수치 시뮬레이션에 의해 결정되었다. 자동차 충돌 시뮬레이션에 사용되는 LS-DYNA가 이 작업을 위해 사용되었다. 가새는 건물의 중력하중 시스템 뿐만 아니라 횡력하중 시스템에도 결정적(critical) 요소로서, 연성을 확보하고 지진에너지를 분산시키는 데 중요한 역할을 담당한다. 가새의 비선형 수치 시뮬레이션은 전체 3차원 비선형 시뮬레이션 모델에 사용되는 좌굴후 축하중/축변형 감소관계를 확립하는 데에 필요하다. 또한, 앞서 언급된 성능목

표 기준에 관련된 비탄성 변형(축방향 축소량) 수용 한계치를 결정하는 데에도 사용된다. 좌굴 후 비탄성 감소관계 곡선은 반복적인 축방향 변위 시간이력 하중 하에서 축방향 축소량의 증가에 따른 강도 감소를 보여준다. 이때, 수용 비탄성 변형은 등뼈형상의 강도 감소 곡선으로부터 결정되어, 큰 지진발생 후에도 중력하중을 지지하기에 충분한 잔류강도가 있다는 것을 보여주었다.

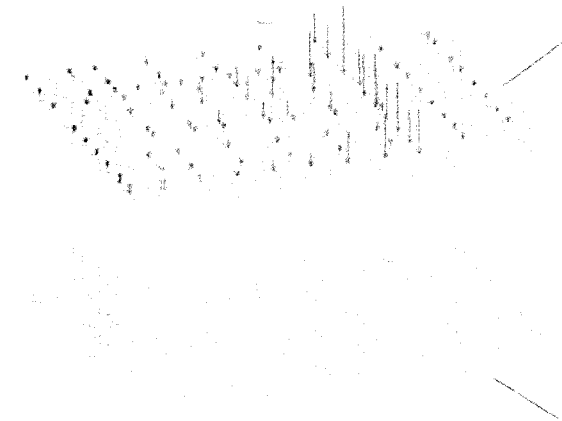
전체 비탄성 구조모델과 부재변형 수용한계치를 확립한 후, 다음 단계는 레벨2, 3의 설계 지진이 작용할 때 3차원 건물의 비선형 수치 지진응답 시뮬레이션을 수행하는 것이다. 최대 비선형 층간변위와 최대 비선형 부재변형에 대한 지진변형 요구(demand)를 결정하기 위해, 비선형 정적 푸쉬오버 해석법과 비선형 동적 시간이력 해석법을 사용하였다. 이러한 변형 요구(demand)는 전체 건물의 내진성능을 검증하기 위해 모든 층과 부재의 구조체 변형 용량(capacity)에 대해 비교되었다. 모든 지진 변형 요구(demand)들은 각각의 수용 한계치 범위 안에 존재하게 되어, 레벨2, 3의 지진이 작용할 때 건물의 정량적, 정성적 성능 목표들이 성취되는 것을 증명하였다.

기초 설계(Foundation Design)

기초판 설계 시, 슈퍼구조 하중이 기초판에 적절하게 재분배되도록 적절한 강도와 강성을 제공하기에 충분한 개수의 파일들을 배치하여야 한다. 파일에 하중이 제대로 분배되는 지를 확인하기 위해서, 비선형 지반 모델을 채택한 반복적인 복합 해석과정이 사용된다.

슈퍼구조 하중을 온통파일 기초 시스템의 이산 모델(discrete model)에 적용하였다. 수백 개의 하중 케이스 조합이 스프레드시트에 자동으로 생성되어 GSRaft의 지반-구조 상호작용 해석기를 제어하였다<그림 11>.

이런 절차는, 안전 작업하중에 도달할 때의 파일들 간 하중분포를 모델링하기 위해서, 해석결과에 상응하여 입력정보를 반복적으로 변화시켰다. 결과가 수렴하고 모든 파일이 허용 용량(capacity) 안에 들 때까지



<그림 11> GSraft model of the piled foundation
파일 기초의 Gsraft 모델

지 해석이 반복되었다. 이런 과정에서 생성된 수백 개의 해석자료들은 기초판의 배근설계에 활용되었다.

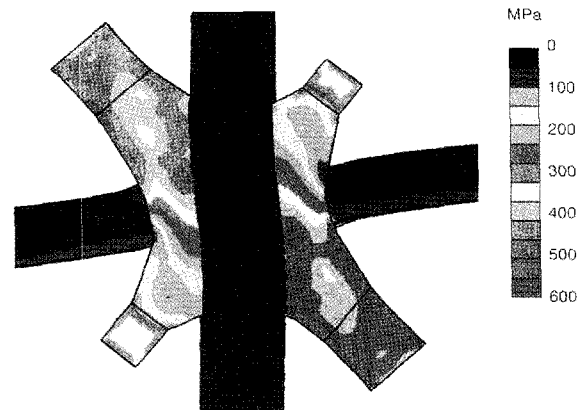
접합부(Connections)

가새와 테두리 보로부터의 힘이, 기둥에 존재하는 응력에 가능한 최소한의 영향만 미치도록, 기둥 단면에 전달되어야 한다. 접합부는 철골 기둥의 플랜지를 커다란 '나비(butterfly)' 판으로 대체하여 형성되는데, 이 판은 기둥면을 통해 가새와 테두리 보로 연결된다. 철골단면 주변의 콘크리트 상세와 시공을 간단하게 하기 위해, 기둥 웨브에 어떠한 접합도 없도록 하였다.

접합부는 '강한 접합부/약한 부재(strong joint/weak component)' 개념에 따라 가새, 보, 기둥과 함께 거동한다. 접합부는, 최소의 항복과 상대적으로 적은 정도의 응력집중 상태로, 가새로부터 전달가능한 최대 하중에 저항하여야 한다. 높은 응력집중은 반복 지진하중 하에 용접부위에서 취성파괴를 초래한다. 이러한 파괴의 주요 원인은 1994년 로스앤젤레스의 Northridge 지진 후 접합부에서 발견된 것과 동일하다. 일반적인 접합부와 큰 접합부를 대표하는 두 개의 접합부가 MSC/ NASTRAN을 사용하여 AutoCAD 도면으로부터 모델링되었다.

접합부에서의 응력크기와 응력집중도를 평가하기 위해, 가능한 최대 재료물성치를 가정하여 가새가 좌굴하거나 항복하기 전에 발생할 수 있는 모든 범위의 힘에 대해 모델들이 해석되었다. '나비'

판의 형상은, 잠재적 항복구역을 최소화하고 응력 집중도가 구조역학과 기계역학 실무에서 통상적으로 허용되는 수준으로 감소될 때까지, 모서리와 노치(notch)를 부드럽게 깎아내어 만들어졌다. 접합부의 최종 형상에 대한 CAD파일은 유한요소 모델로부터 불러들여서 후속된 도면작업을 위해 사용되었다<그림 12>.



<그림 12> The von Mises stress distribution of a large connection plate under the most unfavourable loading combination
가장 불리한 하중조합하의 거대 접합부 플레이트의 von Mises 응력 분포

트랜스퍼 구조(Transfer Structures)

'타워'에서의 경사는 독특한 형상을 제공하기만, 내부 철골 기둥과 코어는 기능적 배치와 엘리베이터와 설비배관 설치 이유로 인해 굳게 유지되었다. 이로 인해, 매 층마다 서로 다른 평면배치가 구성된다. 즉, 코어에서 파사드까지 스패와 파사드에서 내부기둥까지의 스패가 각각 달라진다. 결과적으로, 코어 한쪽에서의 바닥판 스패가 충분히 감소하면 내부 기둥은 제거될 수 있다. 반대로, 코어 한쪽에서의 바닥판 스패가 상당히 커지면 추가적인 기둥이 필요하게 된다. 트랜스퍼 트러스(transfer truss)는 내부코어와 '타워'의 외부 튜브구조 사이를 연결하여 추가적인 기둥들을 지지하게 된다. 트랜스퍼 트러스는 일반적으로 두 개 층 높이를 구성되고 설비층에 위치하여, 조망으로부터 감춰지고 바닥판 계획에 대한 영향을 최소화되

도록 하였다.

트랜스퍼 트러스는 자체 크기로 인해 잠재적으로 외부 튜브와 내부 철골 코어를 연결하는 아웃리저로 거동할 수 있는데, 이는 지진력을 상대적으로 세장한 내부 코어에 끌어 들이기 때문에 바람직하지 않다. 바람직한 설계는 모든 지진력이 보다 강건한 '연속튜브'의 교차 그리드(diagrid) 골조에 작용하도록 하는 것이다. 결국, 트랜스퍼 트러스는 내부 코어와 외부 기둥에 편접합으로 연결된다. 트랜스퍼 트러스의 기하형상으로부터 아웃리저 효과가 발생하지 않는다는 것을 검증하기 위해, 상세한 해석들을 수행하였다.

'오버행'을 형성하도록 두 개의 기울어진 타워로부터 캔틸레버로 뻗어 나온 바닥판들은, 바깥쪽의 '연속튜브' 구조에 의해 둘러싸였다. 이것은 '오버행'의 바닥 두개 층에 있는 두 방향 트랜스퍼 데크를 지지하고, 데크는 다시 위층 바닥판들에 대한 기둥을 지탱한다.

'베이스'는 스튜디오들에 걸쳐서 기둥과 위층 바

닥판을 지지하는 주요 트랜스퍼 트러스를 포함한다.

시공 이슈(Construction Issues)

건물의 독특한 형상으로 인해, 설계과정 내내 시공방법에 대한 주의 깊은 고찰을 요구했다. 시공방법과 작업순서<그림 13> 모두가 '연속튜브'에서의 고정하중 분포에 영향을 미칠 것이다.

시공업자가 시공방법과 프로그램에서 어느 정도의 유연성을 갖도록, 최종 고정하중까지 점차적으로 하중을 증가시키기 위해 단계화된 시공과 하중 재하를 통해 상한 해석(upper bound)과 하한(lower bound) 해석이 수행되었다. '오버행'이 타워들 간의 버팀대로 작용하기 때문에, 두 '타워'들이 연결될 때 하중의 하한이 '오버행'구조에 최대 응력을 가하게 된다. 반면, '타워'가 캔틸레버로서 휨에서 하중을 전달하기 때문에 상한이 최대 응력을 가하게 된다. 이러한 두 가지의 극단적인 경우들 사이에, 시공업자가 자체 프로그램을 선택하고



<그림 13> One of several construction sequence loading arrangements considered
하중분포에 영향을 미치는 시공순서의 한 예



〈그림 14〉 Site work begins, September 2004
2004년 9월 착공

대안적인 설치절차를 제안할 수 있는 영역이 있다.

온도차와 풍환경으로부터 타워 간의 상대적 변위를 최소화하기 위해, '타워'들 간의 연결 시점이 중요하다. 또한, '타워'들에 의해 구속되는 부분에

서 '오버행'으로 과도한 응력이 전달되게 할 수 있는데, 이를 방지하기 위해서 온도차로 인한 '타워'들 간 변위를 최소화하는 것도 중요하다.

결론(Conclusion)

CCTV의 구조설계를 통해, 설계팀은 많은 기술적인 도전에 직면하였다. 이것들은 매우 빠박한 프로그램 안에서 성공적으로 극복되었다. 프로젝트의 각 단계마다 적절한 인력을 배치하는 Arup의 독특한 경험과 지식의 깊이가 이를 가능하게 하였다. Arup팀은 표준 시간대, 물리적 거리, 문화, 비용, SARS³⁾의 출현 등을 극복하고 빈틈없는(seamless) 국제적 공동작업을 통해 설계를 완수하였다. 중국 건설부의 전문가 위원회의 승인을 받으면서, 건축주에게 정시에 복합적인 최종 설계안을 전달할 수 있었던 것은 무엇보다도 설계팀의 뛰어난 공동체 의식 때문이었다.

3) 중증급성호흡기중후군(Severe Acute Respiratory Syndrome)의 약자로서, 최근에 중국, 홍콩, 싱가포르, 베트남 하노이 등에서 발생해 전세계로 확산되고 있는 발열과 기침, 호흡곤란, 폐렴 등 호흡기 증상을 보이는 전염병