

Structure

Architecture

『2013 建筑、结构巅峰对话：结构成就建筑之美』
2ND DIALOGUE OF ARCHITECTURE AND STRUCTURE

The Structure of Shenzhen Bay Sports Center

钢织春茧

——“深圳湾体育中心”结构轻盈飘逸之美



陈彬磊

Chen Binlei / Vice Chief Engineer / BIAD

北京市建筑设计研究院有限公司副总工程师

代表作品：中国电影博物馆、深圳湾体育中心、中国科学技术新馆、北京 LG 大厦、联想融科资讯中心 C 座、北京西客站站房及综合楼等。



扫描二维码
可进入报告视频



图1 开幕式前的深圳湾体育中心

深圳湾体育中心是 2011 年第 26 届世界大学生运动会主场馆，建筑方案由日本佐藤株式会社和北京市建筑设计研究院有限公司共同完成。结构设计全程由北京市建筑设计研究院有限公司承担。整个项目前期立项由政府方面承担、后期建设由华润集团旗下“华润深圳湾发展有限公司”组织。

由于项目前期工作的曲折，造成留给项目设计、建造周期极短。整体项目 2009 年 6 月开工建设，要确保 2011 年 8 月 12 日大学生运动会的召开及使用，除调试运行外，建设工期不足两年。在业主团队的出色组织、设计团队的共同努力、参建施工方夜以继日辛苦耕耘下，如期完成工程建设。2011 年 1 月，深圳市政府召开专门常委会，决定将深圳湾体育中心由分会场调整为大运会主会场，承担开、闭幕式，对项目予以充分肯定。人们常常说“北有鸟巢，南有春茧”，该项目目前已成为深圳的标识性项目，获得市民的喜爱（图 1）。

工程概况

深圳湾体育中心位于深圳湾滨海休闲带中段，南山后海中心区东北角，深圳湾后海填海区内，也是深圳重点城市景观和公共活动空间。整个项目占地约 30.77ha，总建筑面积 25.6 万 m^2 。整个春茧东西长 500m，南北 242m（图 2）。

春茧下覆盖“一场两馆”：体育场容纳观众 2 万人（固定座位），综合馆容纳观众 1.3 万人（其中固定座位 1.0 万个），游泳馆为游泳训练池，可容纳观众 2 千人（其中固定座位 500 个）（图 3）。大运会期间，承担了开幕式，足球预赛、乒乓球决赛、游泳训练场地等功能。赛后体育中心主要作为全民健身场所服务于周边群众，同时承

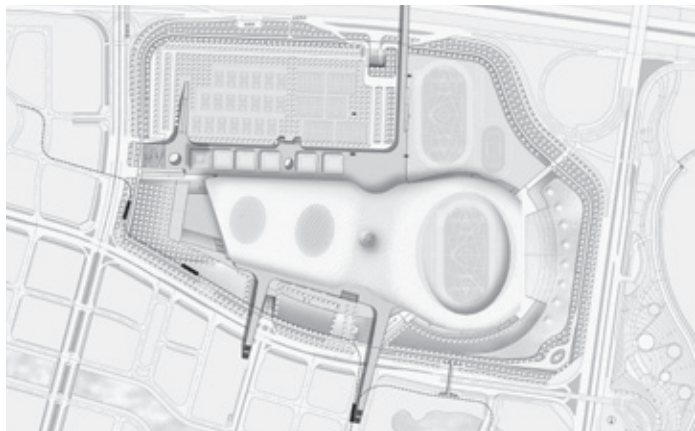


图2 深圳湾体育中心总平面图

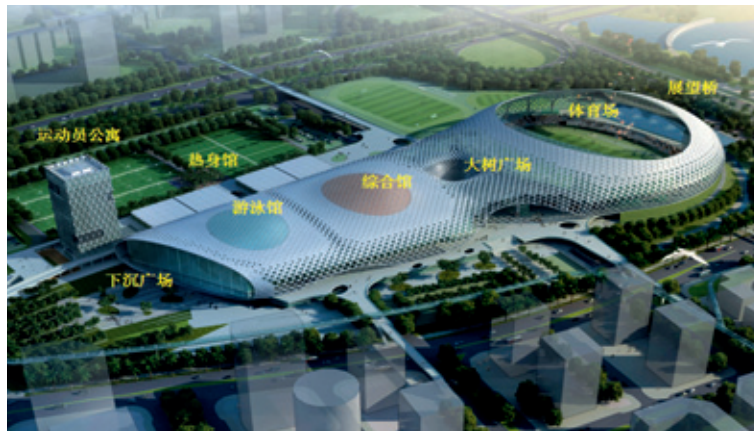


图3 深圳湾体育中心分区图

担部分国内综合赛事、专项赛事、体育训练功能及商业运营设施。由于项目是集约型建设，为赛后运营带来极大便利，几年来，已成为目前国内赛后经营最好的场馆。

结构体系

项目地下室及地上看台部分均为全现浇钢筋混凝土框架－剪力墙体系，采用桩基础（图4）。

上部屋面钢结构大部分为由弯扭构件构成的单层网壳（图5，6），两馆屋顶为曲面网架。在确定结构方案时，有两个方向性选择：1）内部不设竖向构件，按照受力要求确定各个杆件尺寸；2）内部适当设置竖向构件，统一各个构件的外型尺寸。最终选择方案2：适当增设树状柱，确保统一的构件外皮尺寸为450mm×700mm（图7），根据受力的要求调整截面钢板的厚度。竖向构件的适当增设，既保证了建筑整体美观的最佳效果，又有效控制建造成本，取得了极佳效果。

竖向支撑系统包括四个部分，分别是：

- 1) 支撑网壳的31棵4分枝树形柱，其中体育馆西侧看台上的8棵树形柱主干为Φ1500的钢管混凝土柱，分枝为Φ900的钢管，其余位置的树形柱主干为Φ600的4钢管柱，分枝为Φ600的钢管。
- 2) 支撑网架与网壳的V形柱（位于网架上弦环梁下），在体育馆周边分布40根，游泳馆周边分布30根。
- 3) 观景桥两侧的桥塔立柱。
- 4) 下沉广场西立面幕墙柱。观景桥采用桁架结构（扁拱形，与上弦网壳对应），上下弦之间通过V形布置的腹杆连接。桥净跨102.8~107.3m，桁架最小高度11.2m，下弦距地最大高度30.4m。

单层网壳除上述支撑体系外，周边及大树广场共分布125个落地支座，其中大树广场38个，其余位置87个。

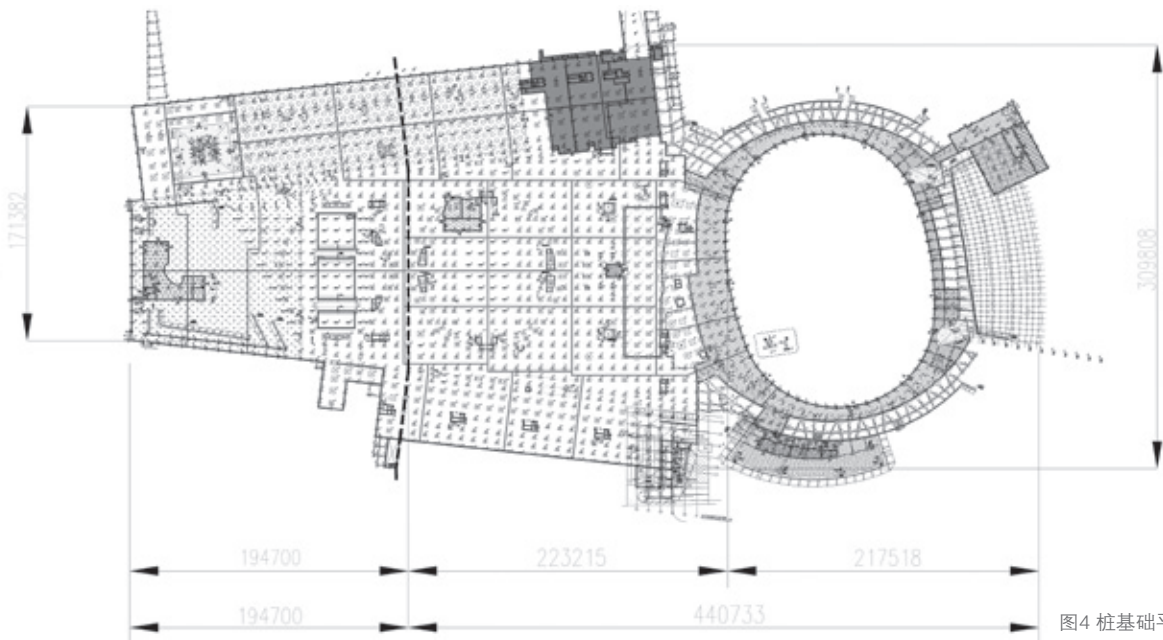


图4 桩基础平面图

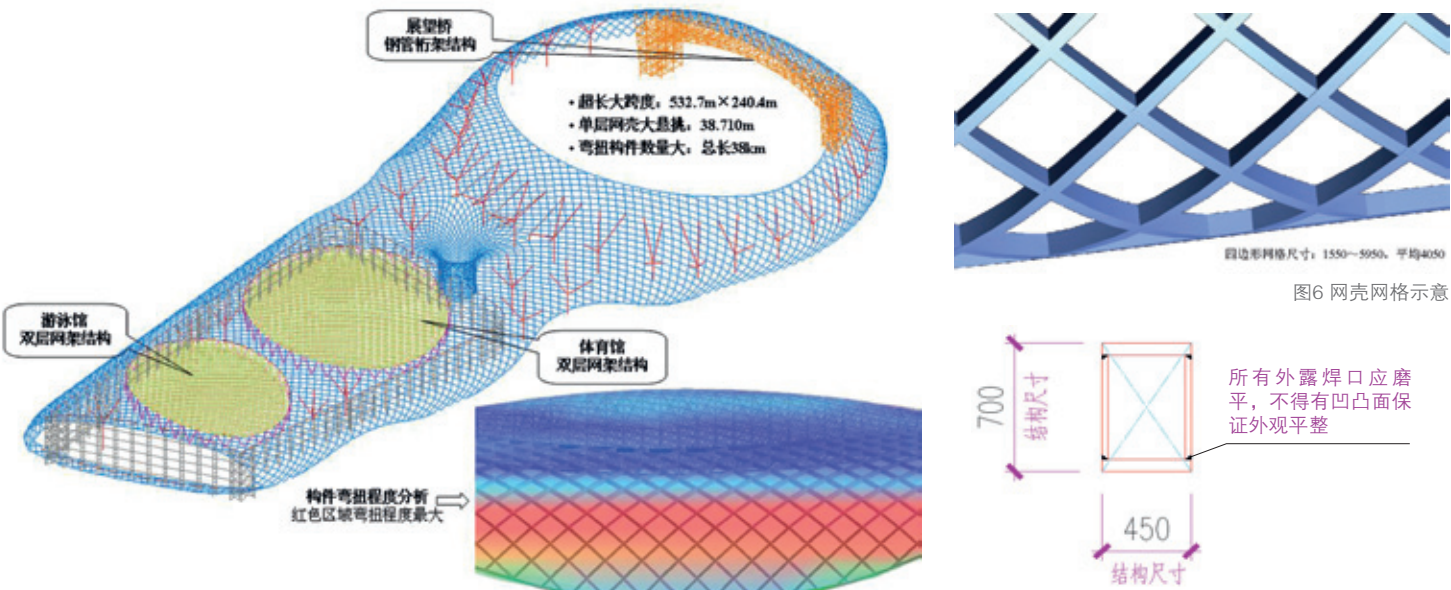


图5 钢屋面结构示意图

图7 杆件截面示意

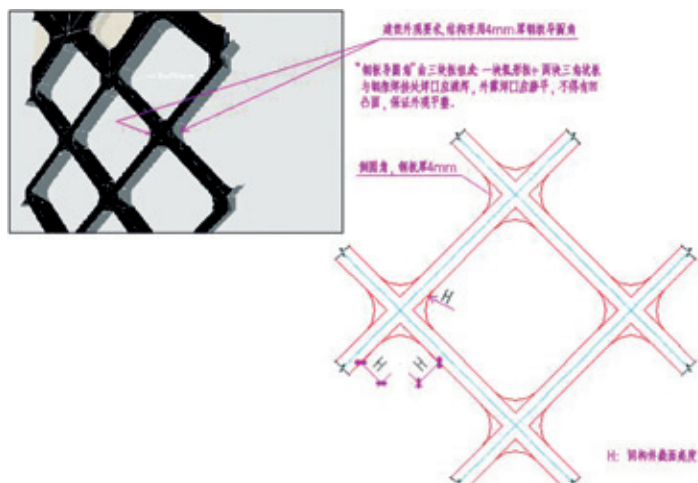


图8 网格倒圆角示意图

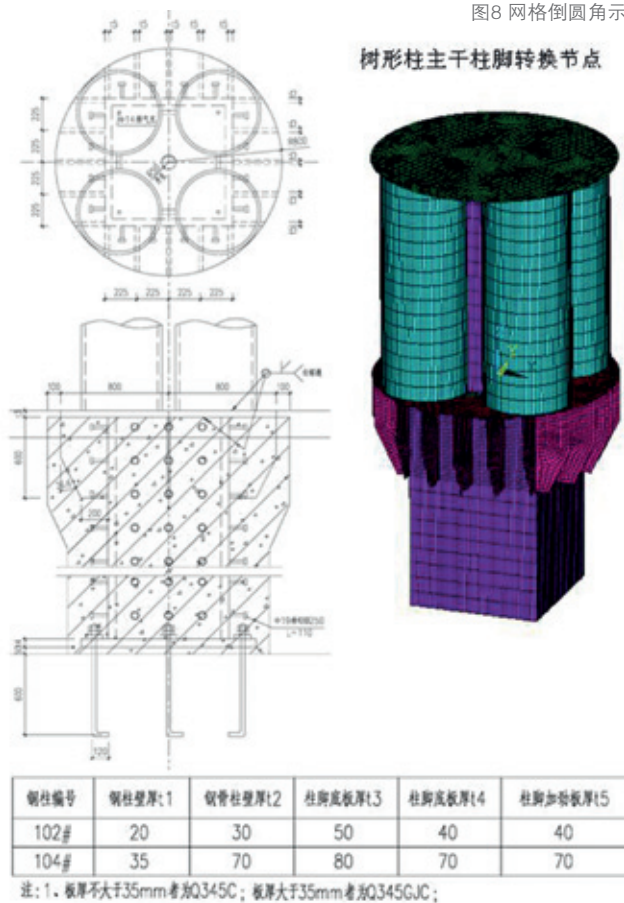


图9 树状柱落地柱脚示意图

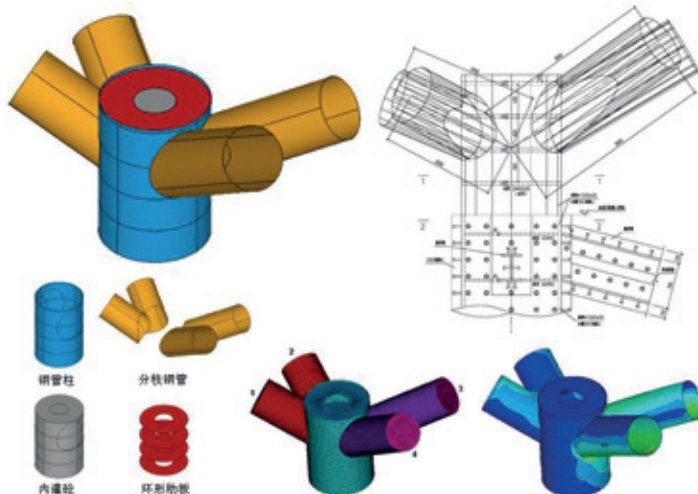


图11 单柱分叉示意图



图10 树状柱分叉及顶端示意图

结构荷载

工程较特别的结构荷载是风荷载和温度作用。

风荷载前期设计取值基于数值风洞的研究成果，后期通过实体风洞的试验成果进行数值修正。

由于工程体量巨大，屋盖整体不设缝，温度作用成为大部分构件的控制荷载，主要考虑四个方面：1）钢构件阴阳面温差；2）西晒温差（太阳落山时，阳光的低角度照射）；3）环境温度变化；4）结构建设时的合拢温度。

采用 CFD 模拟研究取得相关成果。

关键节点设计

1 网格倒圆角

结构设计两个长方形杆件交接近似直角，而建筑师要求是圆角，实际工程中用 4mm 的钢板把圆角导出来焊接上去（图 8），节约了钢材。

2 树形柱落地柱脚

该位置涉及混凝土部分与钢结构的交接，需要保证传力需求并达到建筑效果要求，是结构设计的难点。柱子落到混凝土上面，树状柱就如 4 根筷子一样在地面下绑在一起，通过埋件将力传递至下部混凝土构件（图 9）。

3 树形柱分叉及与屋面连接

树形柱顶端跟屋面怎么结合、分叉怎么分都是建筑师很关心的问题，具体情况详见图 10，单柱分叉较为简单（图 11）。

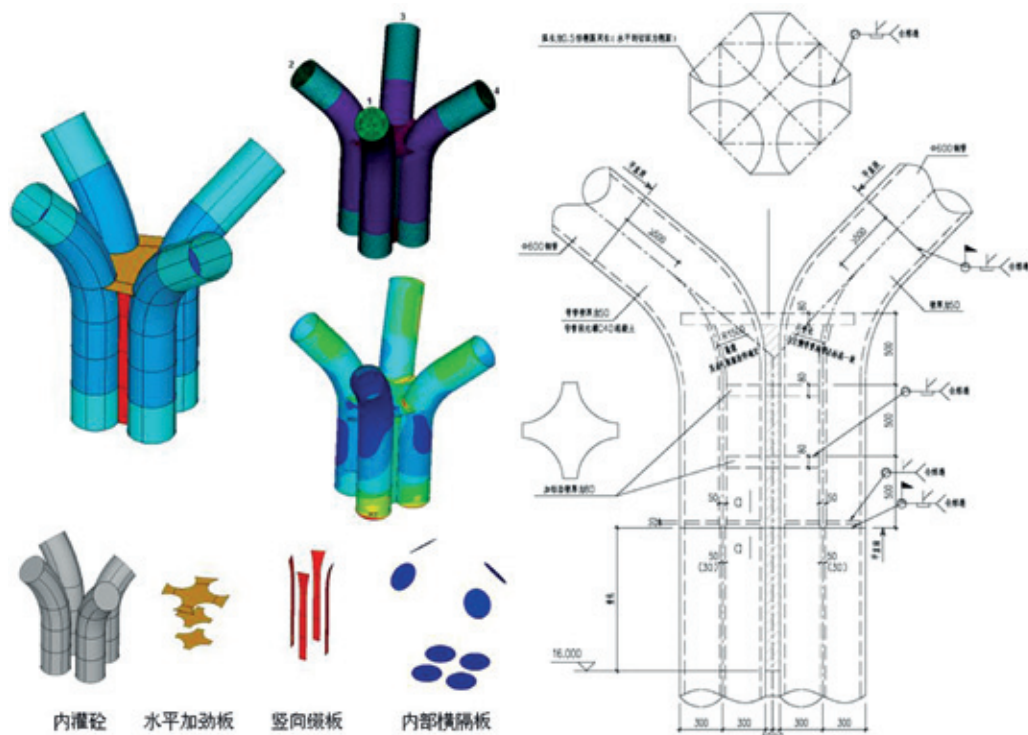


图12 树状柱分叉示意图一



图13 树状柱分叉示意图

树形柱分叉与网壳连接节点

三种可选方案:

- 1) 与网壳单向铰接: 销轴节点;
- 2) 与网壳双向铰接: 万向关节、球铰(铸钢);
- 3) 与网壳刚性连接: 相贯节点(焊接、铸钢)。

节点形式	销轴节点	球铰节点	相贯节点
受力性能	差	好	好
建筑外观	差	中	好
经济成本	低	高	中

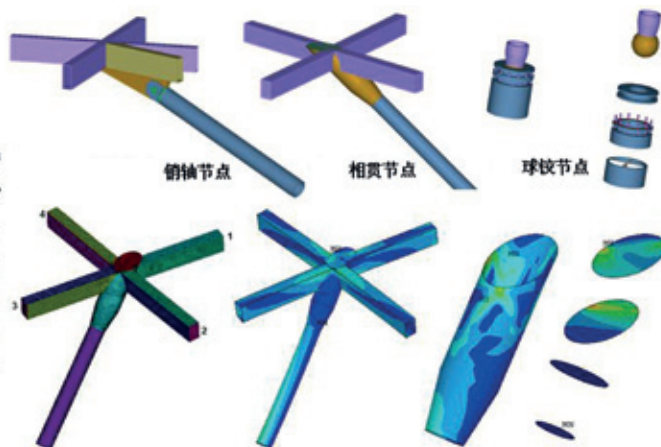


图14 树状柱屋顶连接节点方案示意图

早期的设计考虑设置铸钢件来解决分叉问题, 造价很高。实际上分叉的地方和与顶的连接节点, 都是钢板加工出来的。在分叉的地方放置了一个 80mm 厚钢板(图 12, 13)。

跟屋面结合的节点考虑了三种方式: 销轴节点、球铰节点和相贯节点, 详见图 14, 最后采用的是相贯节点。

钢结构施工质量和安装偏差验收标准

深圳湾体育中心钢结构复杂, 设计和施工都鲜有实例, 除执行常规质量验收标准外, 部分质量验收项目“无据可依”。为加强钢结构工程的质量管理, 保证钢结构工程质量, 根据相关规范、标准和设计要求, 设计院专门制订相应标准, 指导施工(图 15)。

结构设计中关键技术方法

1 超长钢结构不设缝

深圳湾体育中心 530m × 240m 的屋盖钢结构不设缝, 混凝土结构的不设缝长度也达 260m。从常规的概念来讲,



图15 新编验收标准

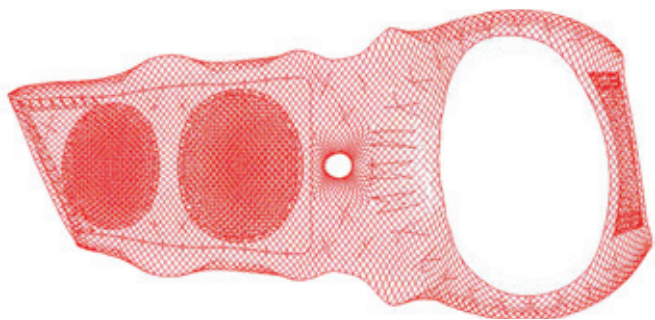


图16 屋盖的温度伸缩变形能力示意图



图17 弯扭构件的图纸表达



温度作用对结构设计必然存在较大影响。然而，通过构件的应力设计发现，部分构件（如网壳落地端支座附近构件）是由温度参与的组合控制，但对于大部分屋面构件，温度参与的组合并不起控制作用。由于屋面采用四边形的网格结构，同时整个屋面在空间弯曲变化，因此，尽管屋盖结构长向尺度很大，仍具有良好的吸收温度变形的能力。在温度作用下，屋盖在短向有很大的伸缩变形能力，从而保证了长向的伸缩变形能力（图16）。

2 “复杂曲面+弯扭构件”单层网壳图纸表达

对于弯扭构件外形的图纸表达，工程设计中创造性地提出并实施了一套全新的方法：通过编程进行数据处理，图纸中给出各个构件中心点的轨迹，同时配给该中心点的方向矢量，这个矢量是中心点与下翼缘中点的连线，最后出来的空间是一条线，并配有间隔的小箭头，通过矢量的转角表明了空间运行轨迹，避免了常规的、给出四条棱线空间轨迹的标识方法，一方面数据量少很多，另外精度很高，因为只有一个点不用跟谁闭合。所以施工单位拿到这个数据处理就特别顺畅，整个后期的加工效率和精度都很高（图17）。

3 成本控制

对设计单位而言，包括从建筑师作为主持专业来说，最怕的就是工程最后跟甲方倒腾投资、倒腾钱，特别是从工程周期看，本工程是一边设计、一边施工、一边修改的“三边工程”。我们在每次出图的时候专门在后边留了一个说明，说明这版图纸里还没有明确的内容，在甲方组织前期招标的时候，要配合甲方留出来未来可能调整部分相应的材料量。因为每吨钢投标的时候是一个价，到工程实际时增加的每吨钢又是另一个价格。

深圳湾体育中心竣工时屋面结构用钢量为 175kg/m²，比我们希望达到标准多了 10kg/m²，但已是较理想的成果了（图 18）。

建筑师与结构工程师

我们经常被很多同行问到怎么理解建筑师与结构工程师的关系，介绍一个小项目。

我们设计过一个学校大门（图 19），大门跨度接近 30m 并挂石材，除了净跨，还有一些造型的东西挂在门框上，建筑师要求外皮高度不能大于 0.85m，这就要求结构外皮高度不能超过 700mm。

结构工程师盯着图纸看了一天，将 BCIS 的字母“l”作为柱子，相当于在接近跨中位置设置了一个支点，很好地解决了这个问题（图 20）。

我认为这就是建筑师和结构工程师的关系：工程师的工作就是为建筑师寻找支点，正所谓“心有大‘l’，自成支点”。

主项	组成	用钢量 (t)	比例 (%)	面积 (m²)	每平方米用钢 (kg/m²)
1. 网壳	a. 单层网壳	9358.3	84.3%	66096.2	141.6
	b. 树形柱	1450.4	13.1%		21.9
	c. 西侧幕墙柱	290.2	2.6%		4.4
	d. 合计	11098.9	100.0%		167.9
2. 体育馆 (预留NBA竞赛条件)	a. 网架构件	670.9	73.0%	9657.6	69.5
	b. V形柱	138.2	15.0%		14.3
	c. 焊接球	109.5	11.9%		11.3
	d. 合计	918.6	100.0%		95.1
3. 游泳馆	a. 网架构件	357.8	71.1%	6029.7	59.3
	b. V形柱	94.1	18.7%		15.6
	c. 焊接球	51.2	10.2%		8.5
	d. 合计	503.1	100.0%		83.4
4. 观景桥	a. 两侧桥塔	1055.6	60.0%	—	—
	b. 桥跨主体	703.6	40.0%		
	c. 合计	1759.2	100.0%		
5. 整体结构	a. 网壳	11098.9	77.7%	81783.5	135.7
	b. 体育馆	918.6	6.4%		11.2
	c. 游泳馆	503.1	3.5%		6.2
	d. 观景桥	1759.2	12.3%		21.5
	e. 合计	14279.8	100.0%		174.6

图18 用钢量表

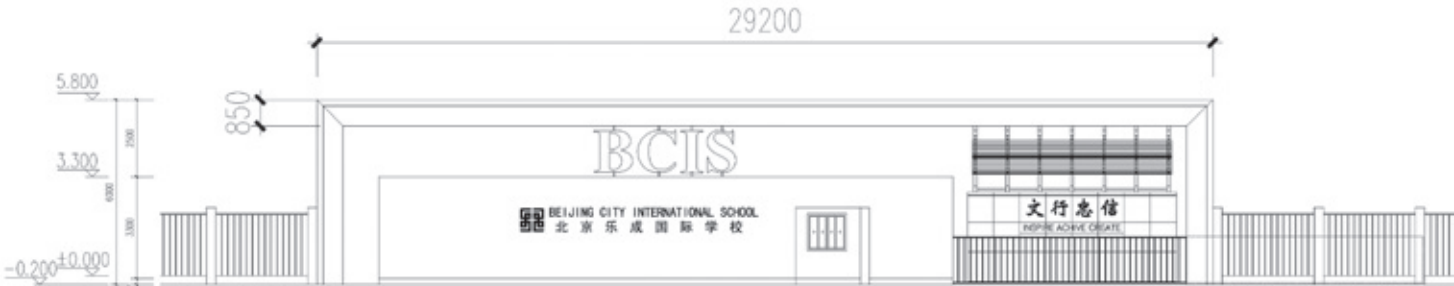


图19 BCIS学校大门



图20 竣工的BCIS学校大门

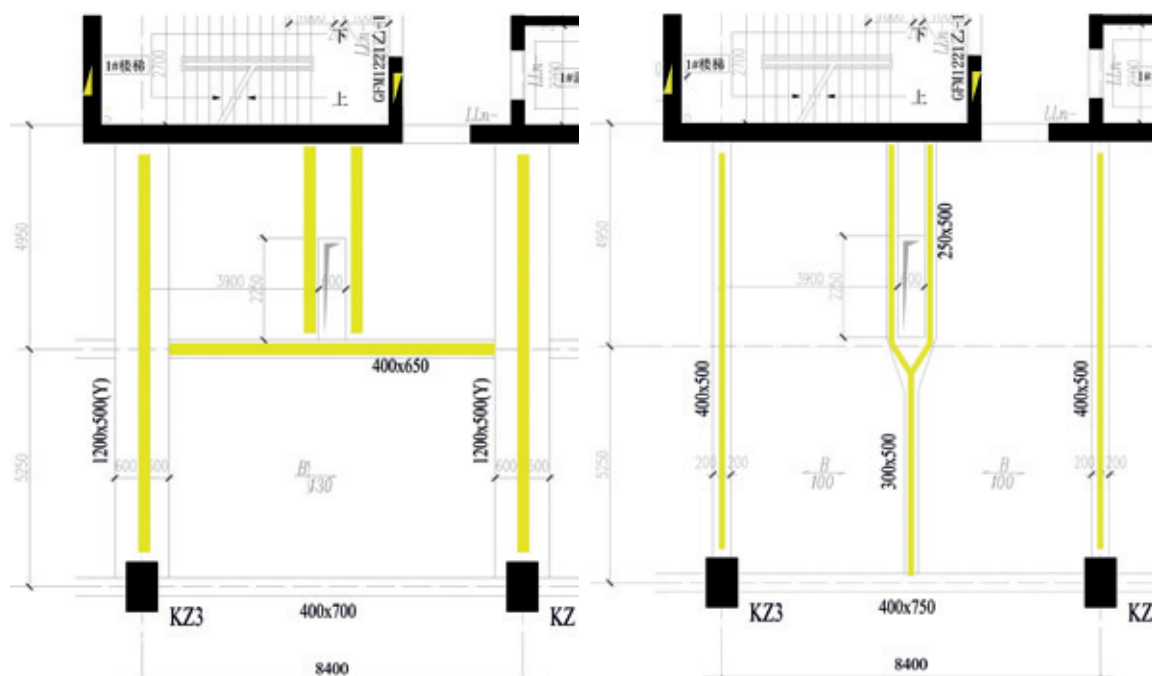


图21a 通常布置的客房梁

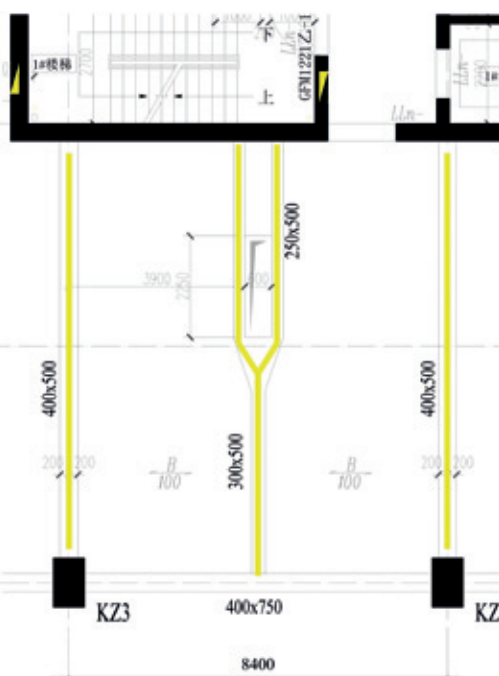


图21b 现浇混凝土叉形梁



图21c 竣工的叉形梁



图22 体会乐观的体育中心位置

结构师心有大爱，肯定会有所发现，比如说图 21 这样一个常规酒店项目，通常一个开间 8~9m，还有两个标准客房间，中间一个核心筒，走道是主风道，两个标准间之间有一个竖井，我们后来就设计了一个混凝土叉形梁，因为边梁对层高没有影响，梁的尺度、负担都降下来了，优化了传力途径，这样对整个层高和外部空间的净高都有很好的影响。

在本文即将结束之际，还是让我们回到深圳湾体育中心吧，希望大家有机会到图中红点的位置坐一下，想想那很有名的诗句：面向大海、春暖花开！体会乐观境界（图 22）。