

THE ROLEX LEARNING CENTER AT EPFL LAUSANNE

结构与建造实现——劳力士学习中心

撰文 M. Grohmann, K. Bollinger, A. Weilandt

图片提供 Bollinger+Grohmann, Kazuyo Sejima+Ryue Nishizawa / SANAA

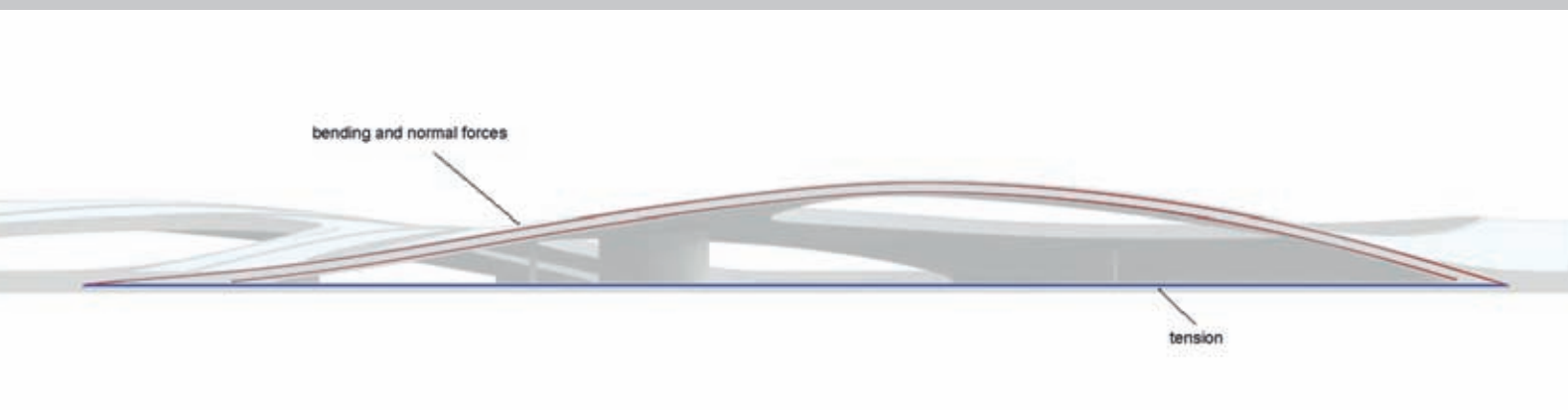


图1 结构示意图：用于水平支撑的后拉缆绳

瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）于2004为其在瑞士沃州洛桑的新学习中心开展了一场建筑设计竞赛。最终，日本建筑设计事务所SANAA，连同德国工程事务所Bollinger+Grohmann摘得竞赛桂冠，并于2010年2月22日建成并向公众开放。这是一栋一层建筑，坐落在一块如园林景观般 $180\text{m} \times 140\text{m}$ 大小的弧形混凝土底板上。该设计之所以获得青睐，在于其波浪起伏的建筑造型不会在视觉上挡住校园内已有的景观，使建筑与周围环境相得益彰。另一个主要原因在于其高低起伏的建筑特色，室内空间形成“山丘”和“低谷”的形态，自然划分成了不同的功能区域，不再需要使用传统的墙体楼板来分隔空间。

劳力士学习中心不同寻常的建筑理念对项目的所有参与方来说都是一种挑战。具体而言，这栋景观建筑包括两组壳体建筑造型，各种跨度与平面空间将二者连接起来。与传统壳体建筑形成对比的是，“贝壳”不再是建筑的屋顶造型，而是室内空间的地面。这栋一层建筑的钢结构屋顶呈波浪形的几何形状，并由 $9\text{m} \times 9\text{m}$ 的柱网固定在建筑物上，围合外墙则全部采用了落地玻璃幕墙。

如此别具匠心的建筑被数个天井分隔，这些天井也为建筑物提供了自然通风与照明，学习中心的出入口也置于这些露天的开阔天井中。而另一些天井则仅仅处于建筑体的平面空间之内，抑或位于拱起的弧形部分，作为波浪形状的延伸。想要进入学习中心，人们需要先从室外公共空间进入由基础撑起的弧形建筑物的下部空间，于是人们就进入了一个“天井”，其入口就在那里。

整栋学习中心表面积达 $121.5\text{m} \times 162.5\text{m}$ ，建筑基础仅一层楼高。停车场、机械设备间、档案室、杂物间等都位于建筑物的基础层中。

结构设计与计算

根据竞赛获胜作品，方案设计的首要任务是要按照贝壳形的建筑造型设计出可行的几何结构，并绘制平面图与剖面图。一方面，这个几何结构必须完全匹配建筑造型要求，比如结构要能够准确实现建筑设计中天井的位置，包括天井外墙的长度，因而天井的外墙最终呈多层层叠交错的网格状。结构还要满足建筑弧形部分中座位的排布设计，以及建筑不同部分的内在连接。此外，用户的需求诸如逃生通道的长度、建筑内斜坡部分两端的可用空间大小、自然照明等，也需要在设计时同时考虑。另一方面，结构工程师们必须同时开发出一套切实可行的结构计算方法。



Manfred Grohmann

Klaus Bollinger

Agnes Weilandt

Manfred Grohmann

毕业于德国达姆施塔特工业大学（Technical University Darmstadt）的土木工程专业，随后留校任教。自1996年起成为德国卡塞尔大学（Kassel University）结构设计专业教授，自2000年起成为德国法兰克福Städelschule 当代艺术学院的客座教授。2007年开始，他同时担任了法国巴黎一所建筑学院École d' Architecture（ESA）的客座教授之职。

Klaus Bollinger

毕业于达姆施塔特工业大学（Technical University Darmstadt）的土木工程专业，其后曾任教于德国多特蒙德大学（Dortmund University）。自1994年起，在维也纳的应用艺术大学（University of Applied Arts）建筑学院结构工程专业担任教授，并于2000年受聘为德国法兰克福Städelschule 当代艺术学院的客座教授。

Agnes Weilandt

毕业于德国亚琛工业大学（RWTH Aachen）。自2010年起担任位于法兰克福的应用技术大学（University of Applied Science）结构分析与结构工程专业的教授。2001到2005年期间，任教于德国斯图加特的一所工业大学的轻量结构与概念设计专业。

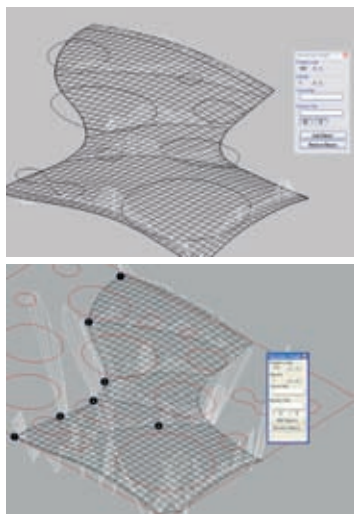


图2 SANAA建筑事务所设计的壳体造型的几何结构曲率分析（上图为结构优化前，下图为结构优化后）

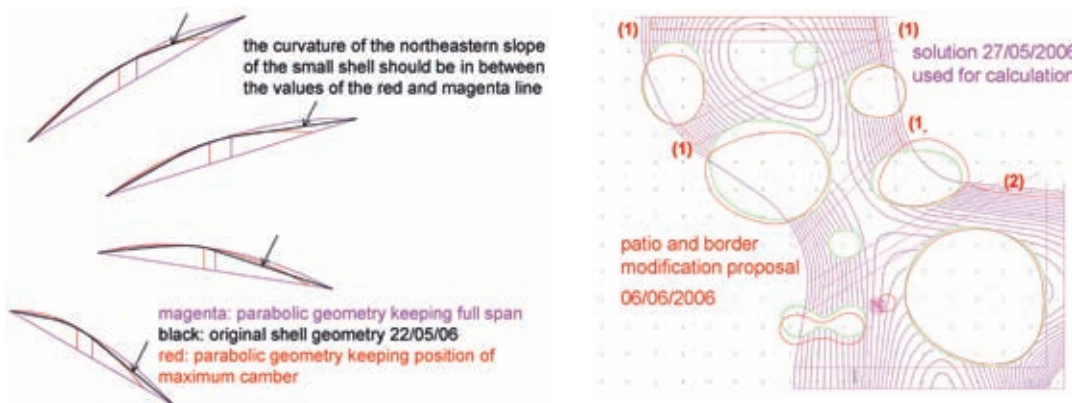


图3 几何结构曲率分析 – SANAA建筑事务所设计的小壳体造型，建议的结构性能（左图），天井的几何分布（右图）

大部分壳体建筑的结构都是作为建筑物的屋顶造型。但在这个项目中，壳体造型需要支撑整个建筑物包括屋顶在内的恒荷载。当然，考虑到学习中心的多种功能，相当于一座图书馆的活荷载必须考虑在设计当中。

与其他常规的壳体结构相比，学习中心扁平细长的结构造型，工程师必须考虑到如何支撑更大的水平荷载以及另一面上更大的垂直荷载。设计通过采用后加拉力缆绳加强了对建筑基础上的混凝土板的固定，从而使其能够担负壳体造型的水平支撑功能（图1）。因此，楼地面无须再考虑水平荷载的因素。

在计算分析过建筑师提出的建筑几何造型后，几何结构的优化过程随之展开（图2）。在这个项目阶段，依然会根据用户需求对建筑造型做一些改进，例如两个壳体造型之间的平面部分面积被加大，这样更易于装修布置。

总而言之，确定最终几何结构的几大重要步骤皆在该设计阶段完成（图3，4）。其中包括根据贝壳型的弧度优化调整结构跨度，几处天井的位置也被再三确认。该阶段中，根据SANAA建筑事务所提供的

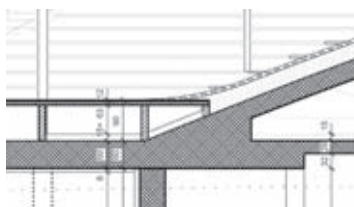


图4 弧形结构支撑详图—楼面几何结构与弧形几何结构的分化



图5 两组壳体造型的有限元网格

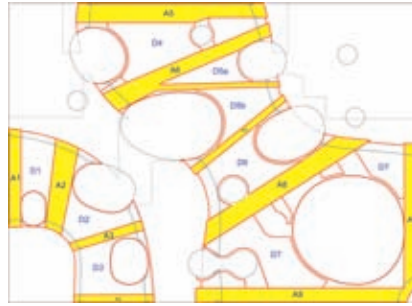


图6 壳体造型中的拱面区与平面区

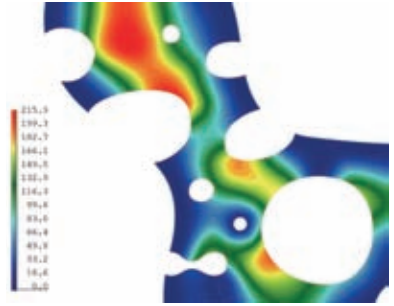


图8 下沉和收缩效应下大壳体结构的挠曲变化 ($v_{max} = 220\text{mm}$)

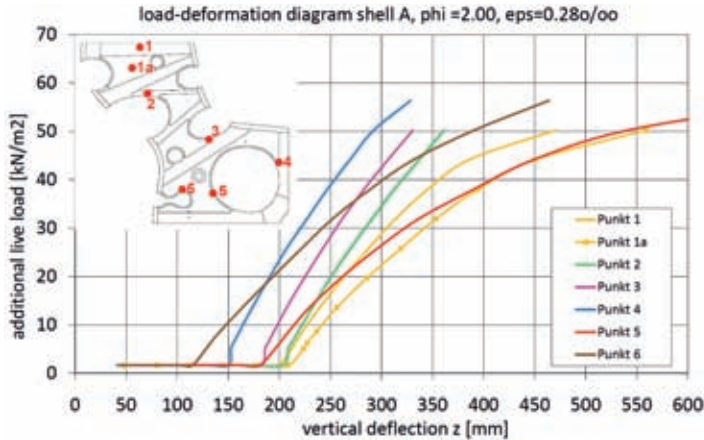


图7 大壳体在荷载增加情况下的负载变形图表

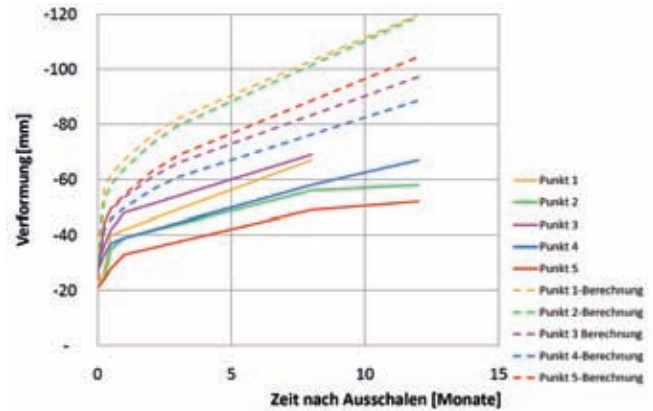


图9 大壳体结构的挠曲变化-计算值与实际测量值

等高线模型，项目的首个3D模型也被制作出来。通过有限元法也可以对这些模型进行分析。一系列计算法则在更进一步的设计阶段根据壳体造型的结构性能被相应地制定，诸如跨度与弧度的最大比例、建筑曲率等，都是在这个阶段建立起来的。同时，首个3D模型结果通过简单的2D模型和手算方式加以验证。

在找形分析和优化过程阶段，线性有限元软件（RFEM）被用于分析在方案设计或优化过程中出现的各种变式，最终结构计算则通过使用非线性有限元软件（Sofistik）得以完成（图5）。通过这个项目，我们能够计算包括滑坡沉降、热胀冷缩之类的非线性结构性能。

通过找形分析，被我们称为“拱面区”与“平面区”的结构方案最终应运而生（图6）。这个最终得以成型的几何结构特征可以具体描述为：较小的壳体最大跨度为40m，弧度约为4.00m，具有相对较优跨度-弧度比 $L/H=10$ ，几何造型非对称。小壳体区域被3个天井分隔，在支撑之间可以建立4组承载拱面。在拱面之间的区域称为“平面区”，平面区具有足够的曲率以形成承载膜力。

较大的壳体跨度达85m，弧度4.85m，具有相对较差跨度-弧度比 $L/H=17.5$ 。大壳体中天井的位置根据上述运算法则，仅可以建立7组承载拱面。大壳体的“平面区”弧度小于小壳体的“平面区”弧度，更高比重的垂直荷载要通过弯曲力矩来转移到拱面上，此外必须在大壳体南面的部分另加3组承重构件以保证建筑牢度并限制变形。其中之一是核心电梯，这也是用户的需求设施；其二是在南边拱面的西下方建造一面承重墙，使得这组拱面可以向下弯曲；其三是在对角处最长跨度的拱面下方支撑一根柱子使其稳固。建筑物的这种极不对称的造型，都是为了保留建筑物北面的独有视野，人们可以透过学习中心朝南眺望阿尔卑斯山脉的壮阔风貌，饱览欧洲最高峰勃朗峰的独特景致。

拱面、垂直承载构件四周区域以及大壳体的天井所需高度均为80cm，而平面区的高度可以降低为60cm。小壳体因为跨度较小和较优的跨度-弧度比，所需截面高度仅为40cm，除了西边的拱面需要50cm高度。80cm与60cm之间的高度差区域正好用来安装排布各种设备管线，从而控制了整栋建筑的高度。

整个建筑结构的抗压稳定性是设计之重。该结构体系产生滑坡沉降和热胀冷缩的可能性也被考虑到结构设计之中。整个设计按照形变系统亦步亦趋。几何结构与建筑材料（开裂、下滑、膨胀）非线性的变化在整个设计分析阶段都被考虑在内（图7）。壳体结构的挠曲设计是另一大设计重点。通过详细的有限元分析法则允许壳体结构的挠度能在相对细微的范围内产生非常规变化（图8）。

计算所得下沉和收缩效应下的最大挠度为220mm，初看之下偏差似乎很大。但比之大壳体结构80m长的跨度，这在合理范畴值 $V < L/300$ 之内。在接下来的建造过程中，预测挠度变量对钢结构屋顶与建筑外立面的设计都尤为重要（图9）。

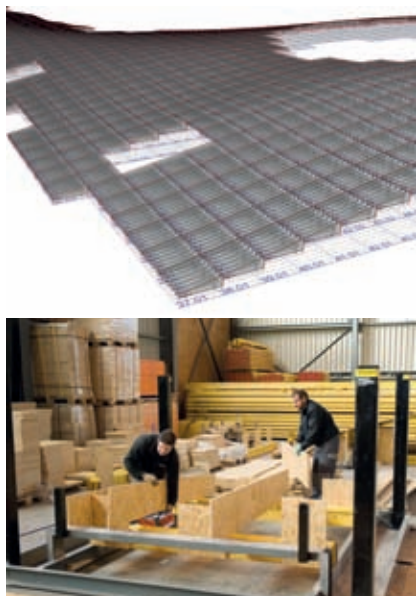


图10 模板基座框架的3D模型及工厂预制模板基座



图12 使用穿孔套管后，焊接连接的直径为50mm的钢筋



图11 施工现场的模板基座；浇筑混凝土之前与之后



最终的混凝土结构要等到壳体结构建造之后才能够安装，所以对壳体结构挠曲变量分析是在已有的恒定数据的基础上进行的。建造完成后的实际测量数据与起初的计算数据十分接近，也证明我们选择了恰当的计算法则并成功模拟了壳体结构的承载性能。

模板设计与施工

除了壳体结构设计，模板施工图的复杂程度和加固设计更是整个项目最艰巨的挑战与任务。

建筑模板是在工厂里预制的，建造在尺寸为 $2.50\text{m} \times 2.50\text{m}$ 的模板基座上。每个基座包括两根木结构底梁，上面盖之以7块OSB板（定向刨花板）。OSB板的下缘水平对齐，上缘则沿着模板表面的轮廓线裁切。模板的表面覆以10cm宽的木板，上面再随之订上胶合层压板。为了建造这些模板基座，建造商更进一步建立了 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 测点网的数据库与3D结构模型。数据经过预输入后，所有的框架结构都可以由电脑操控自动切割刀裁出所需尺寸（图10）。到了工地现场，只需要精确调整基座底下脚手架的水平向位置，然后就能直接安装基座了（图11）。

钢筋工程

壳体结构的曲率较小，又因拱面的极度不对称性，除了卓越性能的混凝土以外，还要加之比例高达 470kg/m^3 的钢筋于其中。钢筋不仅在大弯曲力矩的地方起到了必不可少的转移牵引力的作用，还能够长期滞缓下沉与收缩效应，要设计壳体结构下基础的建筑节点并付诸执行需要先完成3D设计。

在具体实施钢筋排布的执行方案之前，我们决定与项目执行公司Losinger密切合作，精确细化这些钢筋分布的设计。这些关键细节通过在现场建造1:1实体模型得以具象化，以求确保混凝土钢筋组合的可行性。从模型得出的数据与经验经过评估分析，继而用于标准大样的优化。

整个拱面钢筋所含的比例很高，同时又要确保钢筋之间有足够的缝隙浇筑混凝土，因此我们采用了直径高达50mm的粗钢筋。如此粗的钢筋在压力下无法用传统交叠的方式相互连接，因为此类钢筋顶端强度极高，容易导致建筑表面开裂。故而必须另辟蹊径，寻求其他连接钢筋的解决方案。使用螺纹套管是一种方式，但是成本过高，我们继而转向考虑采用焊接连接。最终在施工时，我们先在钢筋末端套上穿孔套管以固定其位置，再使用焊接来连接钢筋（图12）。

一旦确定了标准的钢筋施工概念，即可绘制上述的钢筋分布详图了。要如何通过更改钢筋的方向实现拱面到平面由上至下的过渡，仍需一番深思熟虑。由下至上的钢筋过渡因为混凝土部分的厚度不同，则无需多虑。



图13 混凝土浇筑期间，拱面与平面过渡区的一比一模型

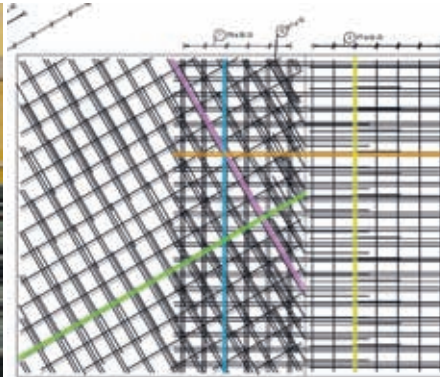


图14 建筑草图显示较低层拱面与平面的过渡区域



图15 一比一天井边梁至平面区的过渡

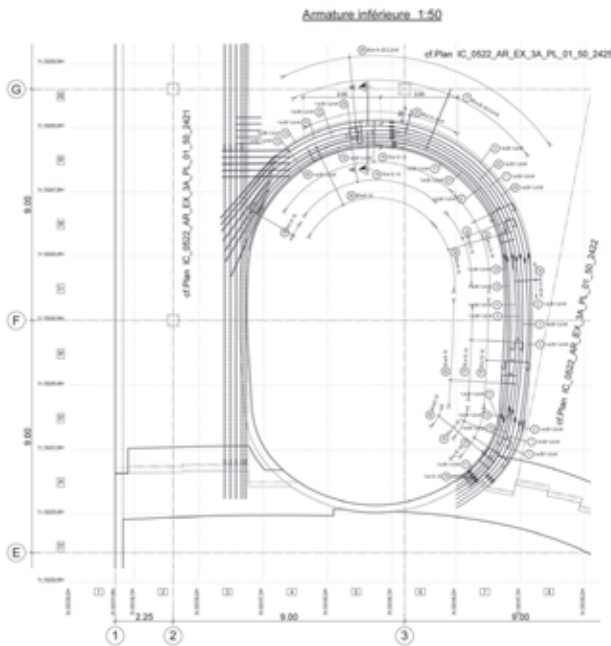


图16 天井边梁的配筋图摘选

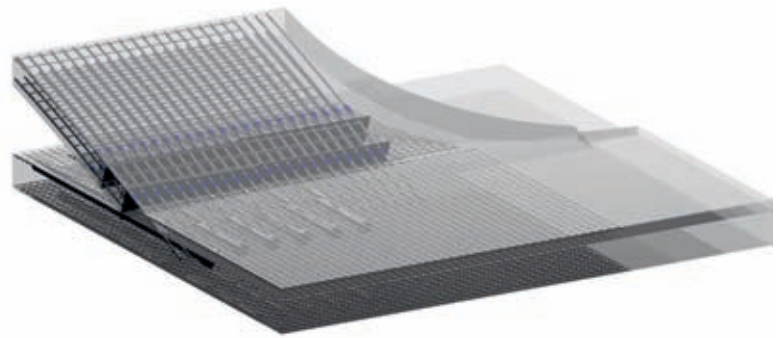


图17 壳体结构承重详图的3D模型，包括基础上层板的后拉缆绳

这个细节的模型要起到同时兼顾测试模架的各个饰面和混凝土部分黏度与抽吸能力的作用。这点至关重要，为了在即使使用反方向模架的情况下，也要保证壳体结构能达到要求所需的倾斜坡度。最初建造的一批混凝土基础部分对水浓度十分敏感且不易定型，因此在之后建造的混凝土中都添加了塑料纤维。这些塑料纤维使得混凝土结构部分即使在有振动的情况下，成型表现依然良好，省去了在壳体结构施工过程中，另外建造反方向模架的人力物力，有些区域斜率甚至高达15%，也能顺利完成（图13，14）。

第二个连接细节模型检测的是天井边缘的横梁，以及天井到平面区的过渡。天井部分边梁的钢筋呈放射状相切，过渡区域设计需要考虑到覆盖边梁与平面区钢筋的过渡角之间的所有跨度（图15）。

最终的解决方案是：通过在平面区另添放射相切的钢筋层，整个平面区的钢筋部分都能被覆盖，由此避免了在施工中弯曲钢筋，并可以用于所有的过渡角处。

天井边梁相交相切的钢筋还需要进一步细化设计。因为采用的钢筋级别很高，所以要尽量避免采用交叠的相连方式，否则会造成留给混凝土部分的振动缝不够充足。天井边缘的几何造型参差不齐，只能根据恒定半径把钢筋加工弯曲，来营造弧形的效果（图16）。为了尽量减少弯曲数量，必须提供牢固可靠的连接，因此天井边梁的钢筋连接，最终采用了焊接与拧锚固件的方式。

第三个与最后一个模型细节、壳体结构支撑都有制作3D效果图的必要，为了准确定位钢筋的位置与方向，用于支撑基础上层板与壳体结构之间的建筑节点（图17）。在壳体支撑结构浇筑以前，无法建造壳体结构的模架基座，所以基座也无法充当背板为构件提供方向定位的作用。

两根口径支撑管水平放置在底层楼板模架之下，用于支撑壳体结构的钢筋则置于其中。通过建立3D模型能够生成口径管所需的几何造型数据，并将数据标注在给施工现场的平面施工图中（图18）。在这非同寻常的施工图上，根据建造模型过程中所得的数据，以及建造第一个贝壳支撑结构所得的经验，对标注信息进行了调整（图19）。

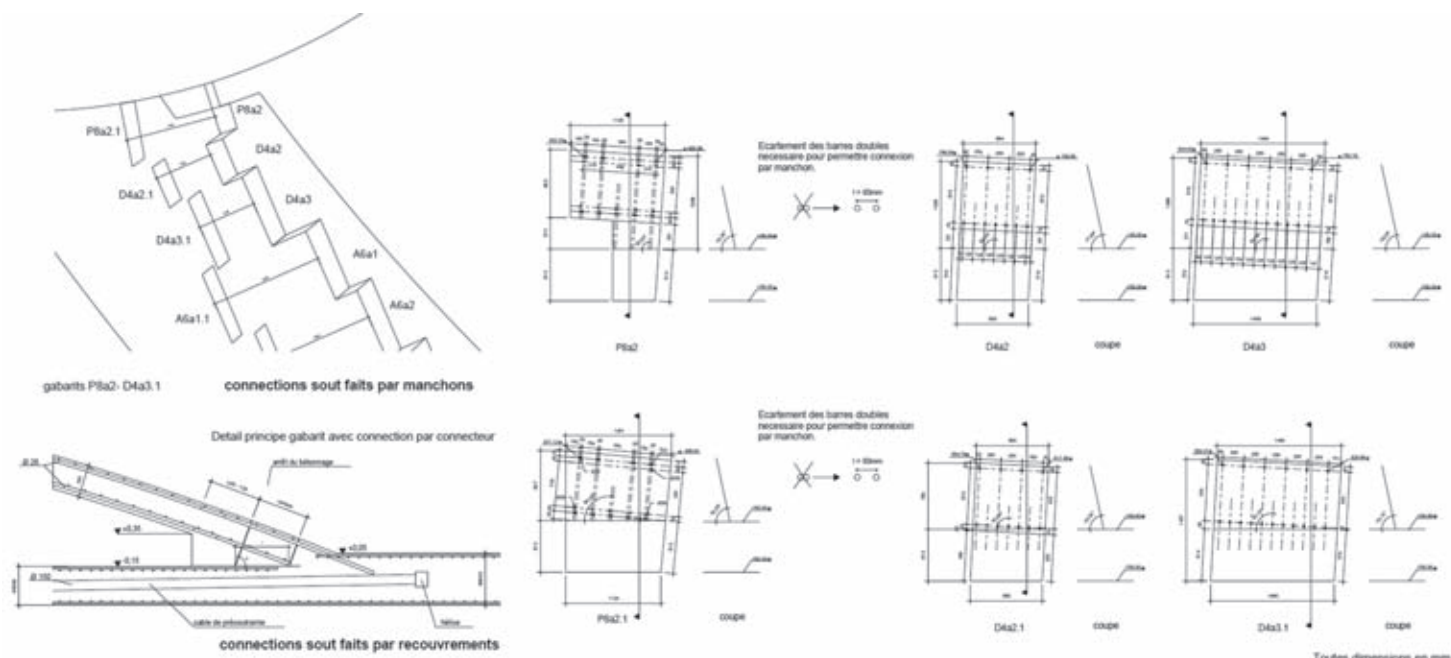


图18 贝壳支撑口径管施工图



图19 支撑壳体结构的建筑节点



图20 拆除模架后的大壳体结构

竣工

拆除模架后的大壳体结构造型令人印象深刻，证明了起初作为建筑景观的设计可以转化成实际可操作的建筑结构（图20）。

由于壳体结构的小曲率，需要在建造时加入比例高达 470kg/m^3 的钢筋来实现结构强度，最终通过采用直径达50mm的钢筋完成了看似不可能的任务。这些钢筋的排布以及各建筑节点的设计，都通过建造3D模型得以实现。可以说，整个劳力士学习中心项目通过各方的协同努力，取得了卓越成功。（译/严佳钰，校/朱晓琳）AT

参考文献

- [1] Grohmann, M., Bollinger, K., Weilandt, A., Wagner, M. Form finding of the shell structures of the ROLEX LEARNING CENTER in Lausanne, IASS 2009 Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structure, Domingo and Lazaro (eds.), 2009.
- [2] Weilandt, A., Grohmann, M., Bollinger, K., Wagner M. From conceptual design to execution. IASS 2009 Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structure, Domingo and Lazaro (eds.), 2009.

Bollinger+Grohmann建筑事务所

Klaus Bollinger和Manfred Grohmann于1983年建立了Bollinger+Grohmann建筑事务所，该事务所在美茵河畔的法兰克福、维也纳、巴黎以及墨尔本设有办公室，旗下员工达数百名。Agnes Weilandt于2006年加入Bollinger+Grohmann并于2011年成为该建筑事务所的合伙人之一。该公司为世界各地的项目和客户提供门类齐全的结构设计服务。多年来，他们与许多国际知名建筑师成功合作了多个项目，始终致力于通过专业、创新的服务为建筑师实现最切实可行的结构实施方案。其业务范围包括为各种商业、零售或展览建筑设施提供建筑结构、外立面设计和建筑性能设计，当然也包括经典常规的土木工程结构设计，如桥梁、屋顶、高塔等。