



◎ 应用及合作工程之一——成都天府国际机场

多物理场仿真技术 大幅提升建造效率

随着建筑业的快速发展，一座座超高层和大体量建筑拔地而起，但一些处于闹市区的工程项目经常会面临施工难题。中建八局首创溜管法不仅绿色环保地实现混凝土浇筑，而且极大地提升了施工效率，缩短了工期。在改进施工工艺过程中，中建八局应用COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件进行了仿真模拟试验，为施工方案的快速优化及实施提供了极大帮助。

文/本刊记者 史海疆

混凝土是一种常用的建筑施工材料，广泛应用于建筑、水利和地铁等各类基础设施。在混凝土的实际运用中，最重要的一步就是浇筑。在混凝土施工过程中，通过泵车的臂架，将车内的混凝土运送到盖楼的模具中直至塑化，因为整个过程耗时长，所以浇筑不彻底就会影响到建筑的整体质量，对建筑物的使用寿命产生巨大的影响。因此，通过先进工艺提升混凝土浇筑的效率和质量成为了建筑行业研究的热点问题。中建八局在混凝土浇筑施工技术上进行创新，借助COMSOL Multiphysics®多物理场仿真软件有效提升了施工进度和质量。

中国建筑第八工程局有限公司（以下简称中

建八局）始建于1952年，是隶属于中国建筑股份有限公司的国有大型建筑骨干企业集团，其前身为国家建工部直属企业。中建八局对于技术研发创新极为重视，拥有1个博士后工作站、1个工程研究院和2个院士工作室。迄今为止，中建八局已承建了50余个大型国际会展中心、60余个大型体育场馆、国内70%省会城市的机场航站楼。

溜管法的高效优化

溜管浇筑基础底板大体积混凝土施工方法已经得到广泛应用，采用溜管法浇筑混凝土更加绿色环保。与传统的汽车泵、固定泵浇筑方法相比，溜管浇筑法占用场地面积小，可实现混凝土

输送过程低噪声、无油耗和不用电，废气排放量大幅降低。此外，大口径钢制溜管全部可以回收再利用，用作建筑后期垃圾排放管道。

但是溜管法存在许多需要改进的地方，比如浇筑方向单一、浇筑速度慢等，极大地降低了施工效率。中建八局在工程项目中首创应用工具化大口径溜管快速浇筑新技术，通过大口径溜管利用重力直接将混凝土送达至浇筑面。结合施工现场实际条件，沿基坑四周设置多道溜管，实现基坑大范围覆盖浇筑，可以大幅提高混凝土浇筑速度。

为了实现对溜管法浇筑混凝土方案的优化实施，在施工之前中建八局首先应用COMSOL软件对试验进行仿真分析。中建八局工程研究院工程师王进博士表示：“在确定溜管法浇筑混凝土最终施工方案之前，我们利用COMSOL软件进行了多次模拟仿真试验，反复对比试验效果，找出缺陷和不足并加以改进，为施工方案的优化提供科学的依据，为确保工程质量打下良好的基础。”

此外，在实施溜管法浇筑混凝土过程中，还需注意混凝土的离析和发生堵管情况，所以要进行坍落度试验来控制混凝土质量。坍落度试验，是用一个上口直径100 mm、下口直径200 mm、高300 mm的喇叭状坍落度桶，分三次灌入混凝土进行填装，每次填装后用捣棒由外向内均匀插捣25下，捣实后抹平。然后拔起桶，混凝土因自重产生坍落现象，用桶高（300 mm）减去塌落后混凝土最高点的高度，就是坍落度。例如，如果差值为100 mm，则坍落度为100。坍落度试验效果图如图1所示，作为基准模型对比仿真结果与文献数据的一致性。

在进行坍落度试验的同时，需要观察混凝土拌合物的粘聚性、保水性，以便全面地评定混凝土拌合物的和易性。

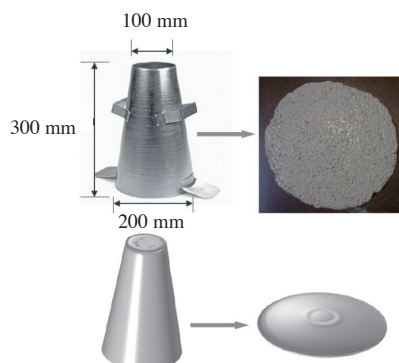


图1 坍落度试验效果图

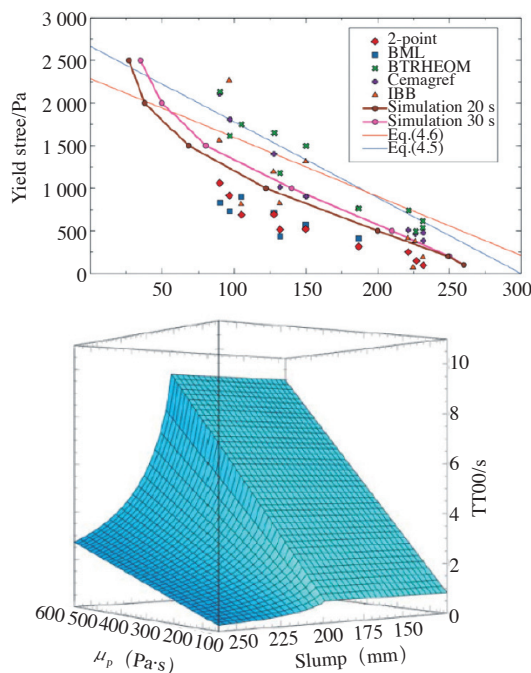


图2 COMSOL Multiphysics仿真分析试验结果

粘聚性的评定方法是：用捣棒在已坍落的混凝土锥体侧面轻轻敲打，若锥体逐渐下沉，则表示粘聚性良好。保水性是以混凝土拌合物中的稀水泥浆析出的程度来评定。如坍落度筒提起后无稀水泥浆，或仅有少量稀水泥浆自底部析出，则表示此混凝土拌合物保水性良好。

通过仿真分析可以得出混凝土流变学参数与现场质量控制试验参数的对应关系，如图2所示，计算结果与试验数据和解析值一致。通过仿真，进一步绘制出动态粘度、坍落度与坍落时间之间的三维曲面对应关系，这些混凝土流变学参数为后续现场质量控制提供参考依据。

图2中上图散点表示试验数据，实线表示解析结果，点线表示仿真结果；下图为仿真得到的粘度、坍落度及坍落时间等混凝土流变学参数之间的对应关系。

为了验证COMSOL软件仿真的准确性，王进博士基于文献中的数据和结果，通过水平集方法两相流模型，建立坍落度试验的基准模型，计算得到锥体扩展后的宽度与高度的对应数值，仿真结果与文献中的数据完全吻合。

在多数情况下，溜管形状和尺寸采取的是固定设计方案，为了提高施工速度和质量，可以调节混凝土的流变学材料属性，满足施工指标。王进博士应用COMSOL软件对溜管施工方案进行了优化。对于高度为 h 的集料斗，倾角固

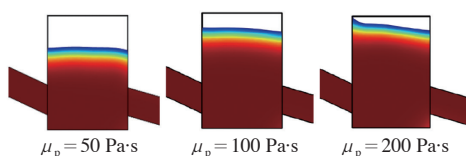


图3 改变塑性粘度得到的流速和体积分数变化

定为 θ_1 和 θ_2 的溜管，通过仿真，研究了改变塑性黏度得到的不同施工流速和体积分数变化，如图3所示。

通过应用COMSOL软件对上述试验过程进行仿真分析，最终确定了主溜管的角度，通过模拟得到优化后的集料斗的高度；集料斗中混凝土的流速分布，判断出流速较低的区域；并通过虚拟试验提出了混凝土现场质量控制的参数。

大体积混凝土施工

COMSOL软件在溜管法浇筑混凝土施工方案优化过程中发挥了重要的作用，为中建八局对大体积混凝土施工方案的设计做出了重要贡献。

从字面上理解，大体积混凝土就是体积较大的混凝土构件，但这种解释显然是不准确和片面的。大体积混凝土不仅结构厚度大，混凝土的使用量大，而且对施工的要求十分高，在施工过程中必须严格控制温度，以防出现裂缝。

大体积混凝土最为典型的特点是由于水泥水化时会释放大量的水化热，从而会使混凝土产生出较大温度应变，同时由于混凝土性能的特点产生收缩变形，当这部分应变收到约束产生的应力超出混凝土的承载极限时，便会造成混凝土开裂。随着裂缝的出现，混凝土结构的整体性、耐久性和防水抗渗性必然会受到严重影响。所以，在大体积混凝土施工时，必须采取有效地措施防止裂缝的产生。

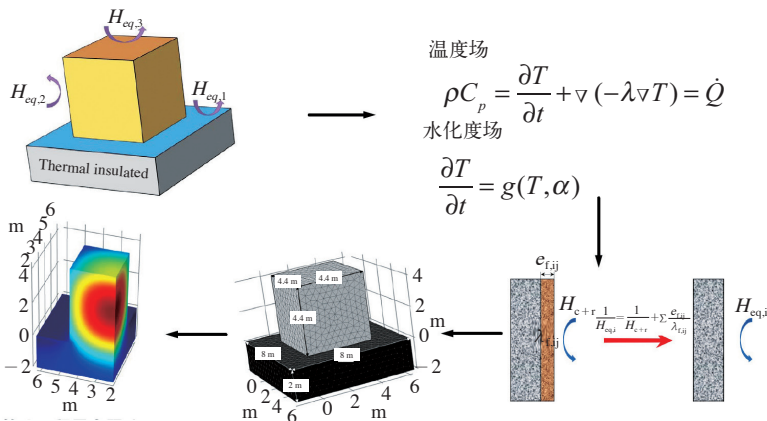


图4 应用COMSOL Multiphysics进行模拟的结果

混凝土在水化反应中逐渐硬化，期间伴随着温度的升高，而温度的变化过程会对混凝土早期和后期的开裂产生重要影响。设计优化的一个重要目的是控制水化过程的最高温度、里表温差和表外温差，降低损伤概率。

中建八局对大体积混凝土施工方案制定的工作流程为：首先对材料进行温升试验，对参数进行拟合，然后应用COMSOL软件进行仿真，根据仿真结果采用足尺试验修正模型，最后进行施工方案设计。

王进博士根据足尺试验创建了一个等尺寸模型，应用COMSOL软件进行建模分析，希望能够通过仿真结果来指导施工方案，更加科学地控制混凝土质量。王进博士总结道：“通过对不同混凝土水化热模型和大体积混凝土早期温度变化的仿真，能够给大体积混凝土相关的投标、设计和施工方案优化提供依据。”王进博士通过建立水化热模型，模拟实际的散热条件，优化配合比，得到不同的水化热模型下水化度参数和温度随时间的演化过程。他表示，下一步计划是通过更多的试验数据可以来验证和修正模型，并依据仿真结果优化施工过程，尤其是养护过程；通过和湿度场、应变场的耦合，可以建立起可靠的混凝土早期变形预测模型。

建筑工程中由于涉及到的尺寸较大，现场工况复杂，通过试验来进行优化设计的成本很高，实现难度也很大。中建八局通过仿真模拟降低了前期设计优化的成本，提高了施工的安全可靠性。

对于现场工程师，有时一个较小的参数修改也会大大提高生产效率。王进博士计划在前期的仿真模型基础上，根据现场需求开发定制不同的仿真APP，提供给他们使用。比如，溜管优化APP，现场工程师即使没有流体相关的仿真经验，只需要在仿真APP界面上根据现场情况修改不同的夹角参数，点击计算按钮即可得到对应的流动仿真结果，从而确认现场控制参数是否符合施工要求，快速获得最优的施工方案。

结束语

在COMSOL Multiphysics®多物理场仿真软件的帮助下，中建八局大幅提高了施工效率和施工质量，不仅提高了自身核心技术竞争力，也为行业在今后施工优化试验中对仿真工艺的应用提供了借鉴。EA