

第五章 ANSYS 在水工中的应用

ANSYS 对于模拟诸如大坝、水电站蜗壳、渡槽、导管平台以及孔闸等建筑物的力学行为具有强大的优势,可以对这些结构的稳定性和应力状态进行分析计算,并且可以进行防渗计算。在计算中可以考虑水压力、淤砂压力、温度场、渗流场、重力场作用,可模拟砼裂缝的形态和发展过程。

一、ANSYS在大坝设计中的应用

我国地域广阔,各地地理环境变化大,气候条件也不尽相同,在修建大坝、水电站蜗壳的过程中不能简单地套用别人的经验,必须以本地的实际情况出发,对当地的地质、气候变化有充分的了解。而且,一座大坝的建成,往往要耗费一两年甚至更长的时间,并且大坝往往涉及到其下游千万人的生命与财产,因此经济效益和安全可靠是两个十分重要的问题。如何保证结构安全可靠,一是要求结构设计合理,二是要科学地安排施工期。对于这样重要而影响因素复杂的建筑物,采用试验模拟成本太高、周期太长、难以通过改变试验参数进行设计及优化,而且许多复杂情况无法用试验进行模拟。现在普遍采用的方法是数值模拟技术即计算机仿真,其中以有限元分析最为普遍。



龙首电站大坝 如图 5.1, 大坝形体和结构极为复杂, 河海大学用 ANSYS 对大坝整个施工过程的温度场与温度应力进行仿真分析, 图 5.2 为某个时刻大坝的温度及应力分布情况; 图 5.3 为坝体上应力 s_x 的最大点 (位于 1723m 高程处) 应力 s_x 在整个施工过程中的变化曲线。图 5.4 为推力敦上应力 s_x 的最大点 (位于重力坝 1704m 高程处) s_x 在整个施工过程中的变化曲线。分析结果良好, 表明 ANSYS 可很好地模拟大坝施工过程, 预测施工过程中温度场的变化及温度应力, 从而有效地指导合理安排施工过程。

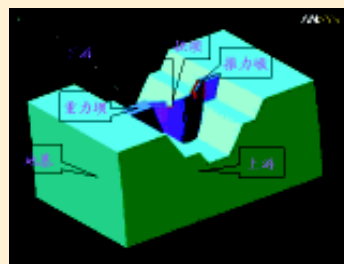


图 5.1 大坝 (含地基) 实体模型

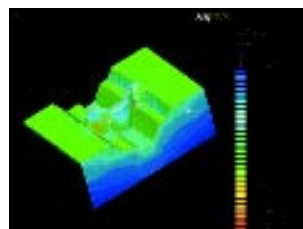
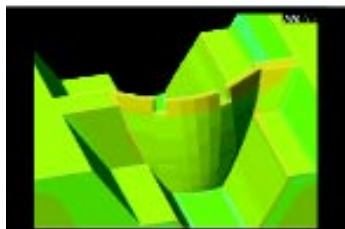


图 5.2 大坝浇注过程中某时刻的温度场及应力场分析

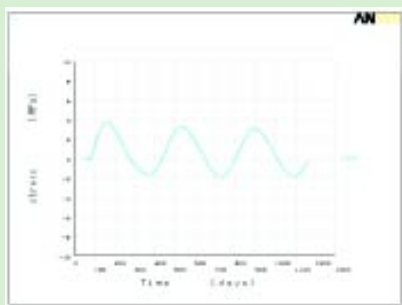
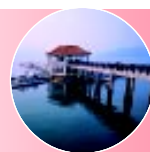


图 5.3 重力坝应力 s_x 最大点在施工过程中的变化曲线

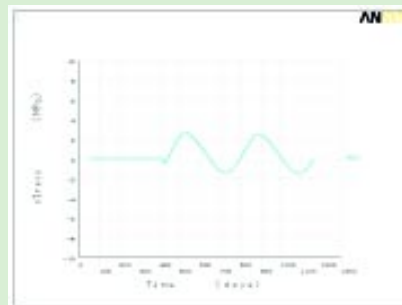


图 5.4 推力墩应力 s_x 最大点在施工过程中的变化曲线

九甸峡大坝 该坝为碾压混凝土重力坝，比较方案为双曲拱坝。根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-1997)，考虑弹性基础影响，用 ANSYS 对该坝作地震反应谱分析。图 5.5 为重力坝有限元模型，图 5.6 为拱坝有限元模型，图 5.7 为重力坝第一主应力分布，图 5.8 为拱坝应力分布情况，5.9 为重力坝振型。分析结果表明利用 ANSYS 软件的特征值与响应谱分析，计算结果合理，目前已被工程采用。

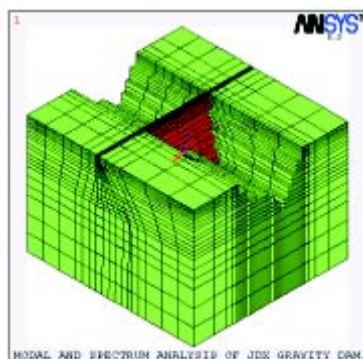


图 5.5 重力坝有限元模型

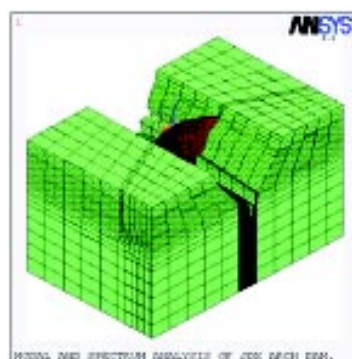


图 5.6 拱坝有限元模型

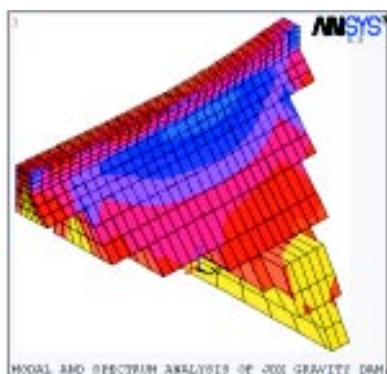


图 5.7 重力坝第一主应力

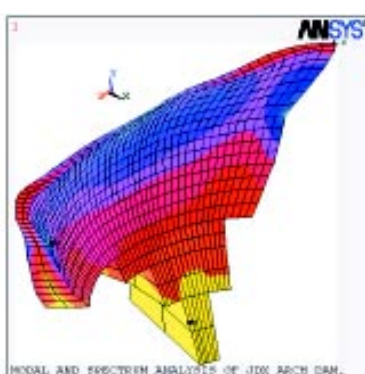


图 5.8 拱坝应力分布

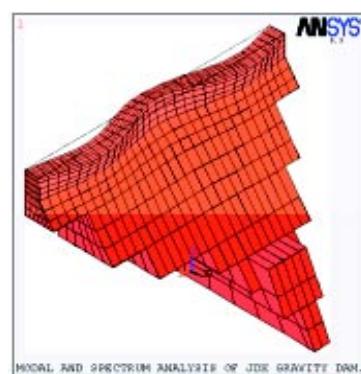


图 5.9 重力坝振型

龙羊峡水电站重力拱坝 实体模型，如图 5.10，该坝的地质构造异常复杂，在建模时模拟了十余条断裂构造。西北勘测设计院用 ANSYS 对该坝进行了弹塑性计算，计算结果与实际运行中监测到的坝体变形吻合良好。

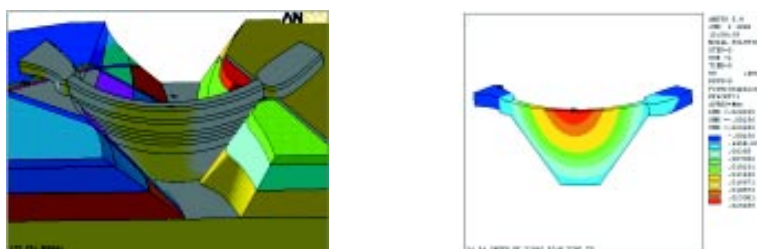


图 5.10 龙羊峡水电站的实体模型及垂向变形

仁宗海电站大坝 该坝为堆石坝，由于大坝位于深厚覆盖层上，需采取强有力的防渗与排水措施，并需对大坝的稳定性和防渗结构的应力状态进行分析计算。武汉大学土木建筑工程学院采用 ANSYS 构造了在复杂地形条件下堆石坝与深厚覆盖层地基的三维有限元模型，进行了三维稳态与非稳态渗流场分析以及筑坝过程的仿真分析，图 5.11 为三维渗流场渗透压力分布图，图 5.12 为三维渗流速度矢量场。分析结果为国家电力公司成都勘察设计院提供了合理可靠的设计依据，为仁宗海电站的设计、施工打下了基础。

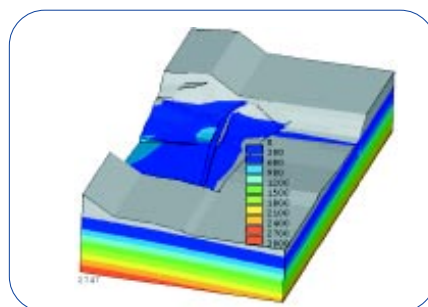


图 5.11 三维渗流场渗透压力分布图

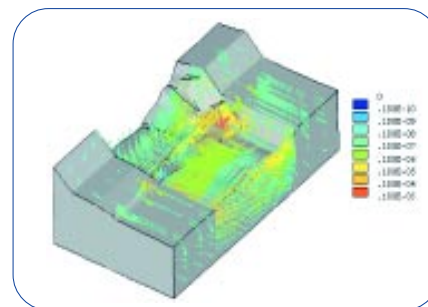


图 5.12 三维渗流速度矢量场 (单位: m/s)

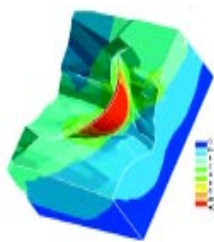
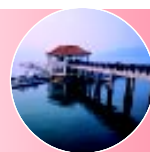


图 5.13 整体位移图 (单位: mm)

江口电站大坝 该坝位于重庆市芙蓉江口，在坝区范围内主要断层有 11 条，另有 4 组较发育的裂隙，形成了十分复杂的地基，用 ANSYS 程序进行三维非线性有限元计算，计算中考虑了水压力、淤砂压力、温度场、渗流场、重力场作用。通过大量计算与分析，得到



了断层, 裂隙区的塑性区位置, 复杂地基对拱坝应力的影响, 以及拱坝整体稳定的结论。图 5.13 为整体位移图, 图 5.14 为主压应力等值线。分析结果作为设计依据被长江水利委员会设计院列入设计书。

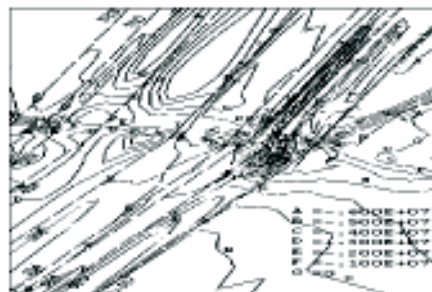


图 5.14 主压应力等值线(单位: Pa)

阳春拱坝 该坝为目前世界上唯一的一座全部用掺 Mgo 砗不分缝快速浇筑拱坝。利用 ANSYS 的 ADPL 语言进行二次开发, 对该坝的施工期和运行期 (共 1080 天) 进行仿真分析。分析过程综合考虑环境温度的起伏、各浇筑块砗水化热的变化、砗入仓温度、坝面温度防护、施工进度、施工顺序、浇筑块的大小、掺 Mgo 砗中微膨胀作用的综合因素。图 5.15 为拱坝浇筑块分区, 图 5.16 为温度应力时间历程曲线。仿真分析的结果与实测资料相比较, 在 1080 天的总体趋势与数量级是一致的, 尤其是不稳定温度场的结果与观察资料的一致性十分良好。

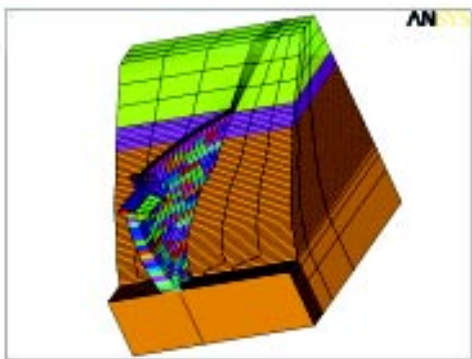


图 5.15 拱坝浇筑块分区

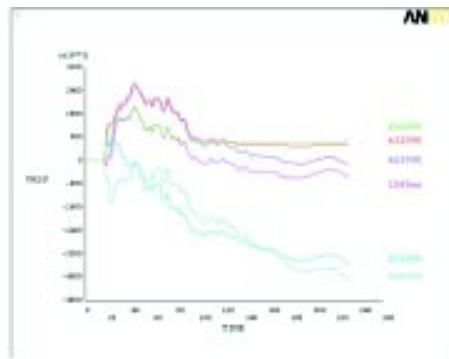


图 5.16 温度应力时间历程曲线

某混凝土拱坝 如图 5.17。拱坝是建筑在岩石峡谷内的变厚度、变半径双曲壳体, 由于其形体复杂, 应力分析是一个比较难的课题。在工程设计中, 过去多采用试凑法, 但近年来, 已被有限元法逐步代替。用 ANSYS 对该拱坝在地震情况下的坝体裂缝分布和开裂进行分析, 坝体在地震波作用下发生开裂, 如图 5.18, 图 5.19 为在地震波作用下坝体的应力分布情况以及裂缝的宽度变化。分析结果对于指导拱坝的地震设计有着参考作用。

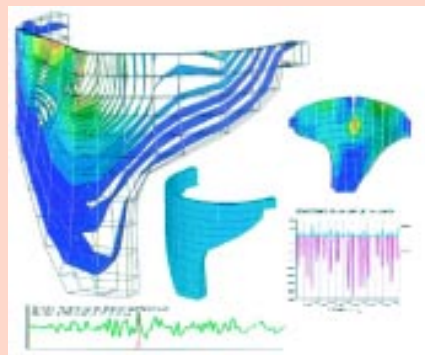


图 5.17 混凝土拱坝



图 5.18 坝体最大裂缝

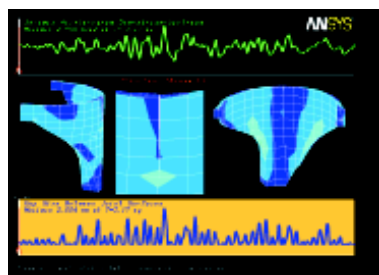


图 5.19 坝体在地震波作用下应力分布以及裂缝宽度

西班牙Málaga-Cartagena港拦水坝

如图 5.20，用 ANSYS 对该坝在海浪力作用下的受力和变形情况进行分析。图 5.21 为各种构造形式的混凝土沉箱，图 5.22 为结构在波浪力作用下应力分布情况。分析结果与坝体的实际力学特征基本吻合。



图 5.20 拦水大坝

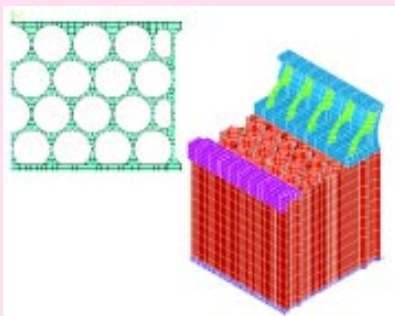


图 5.21 混凝土沉箱

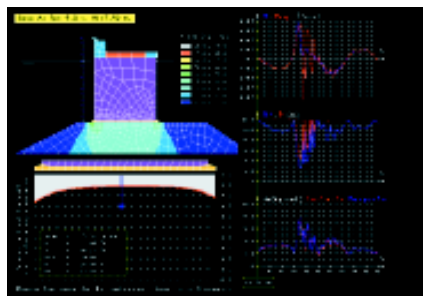


图 5.22 结构应力分布情况

二、ANSYS 在蜗壳设计中的应用

二滩水电站蜗壳

如图 5.23，是由 25 段变直径、变厚度的壳体，20 个固定导叶、两个环形板和其它支架构成，ANSYS 以全参数化的方式很方便地建立起了分析模型，进行了在重力、内压和支撑作用下的静力分析和优化设计，获得了很好的结果。

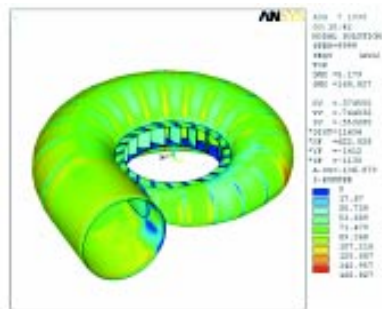
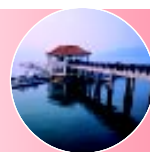


图 5.23 二滩水电站蜗壳



三、ANSYS 在海洋平台设计中的应用

ANSYS 可提供支持圆管形构件的流体静力、动力效应的 PIPE59 单元，可以计算位于水中的圆管形构件的浮力、流力、波浪力的静载荷与动载荷，采用 PIPE59 单元并结合 ANSYS 提供的丰富的单元类型，可以求解导管架平台的动力问题。此外，ANSYS 还可用于自升式平台、坐底式平台、半潜式平台、海底管线、半潜式平台与单点系泊锚泊定位系统的结构有限元静力、动力分析，可成为海洋工程结构设计的有力工具。

某海洋导管架平台 用 ANSYS 对该平台进行波浪工况静力分析、冰工况静力分析、地震工况响应谱分析和波浪工况动力分析。图 5.24 为导管架平台位移分布图，图 5.25 为导管架平台轴力分布图。分析结果表明，ANSYS 可进行包括波浪载荷作用下的导管架平台的结构静力、动力有限元分析，可以方便地进行规范要求的强度校核计算，是导管架平台结构设计时可以采用的有效工具。

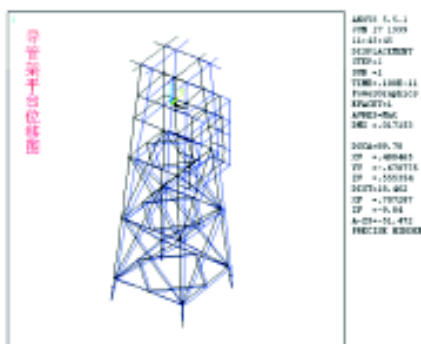


图 5.24 导管架平台位移分布图

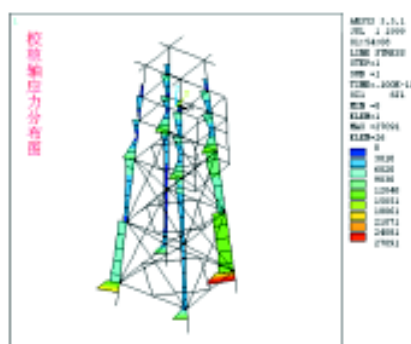


图 5.25 导管架平台轴力分布图

四、ANSYS 在渡槽设计和施工中的应用

东深供水改造工程 是向香港、深圳供水的跨流域大型调水工程，全长约 50 公里，投资达 40 亿。用 ANSYS 建立该工程的三维有限元模型，并模拟开挖、浇筑、回填的过程，计算考虑了土的固结、开挖回弹及地基与结构回填土的相互作用等因素。从计算结果提出的地基处理措施、施工措施、结构改进措施已被采纳，消除了不均匀沉陷造成的漏水可能性，取得重大的经济效益（见图 5.26、5.27）。

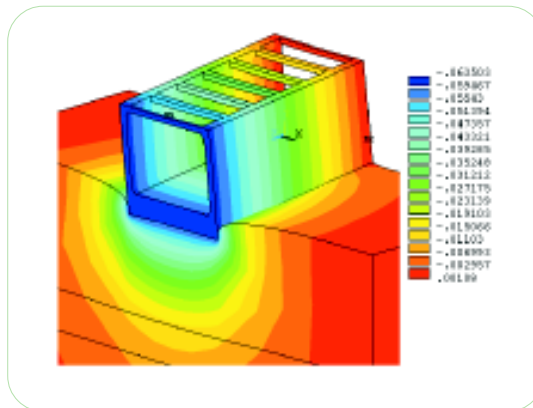


图 5.26 Q14 + 630 处明槽与渡槽接合段相对沉降量

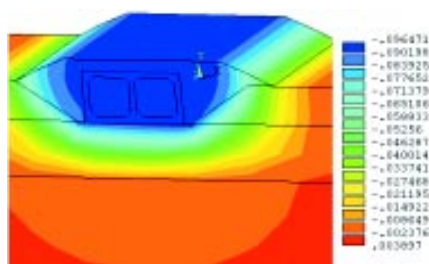


图 5.27 L4 + 120 处双孔箱涵加碎石桩后沉降位移

利用 ANSYS 的固液耦合功能可以解决水下结构的动力特性、无限表面吸收效应等问题以及计算液体和固体耦合系统的动力特性和动力响应问题。

某渡槽 有限元模型如图 5.28 示。渡槽主体结构为混凝土，计算有水情况下的动力特性和在 X 方向地震响应谱作用下的应力和应变情况，并与传统处理方法作比较分析；传统的方法是将水按质量等效到渡槽两侧水作用的侧壁上或将水等效成密度相等且刚度很小的固体材料；这两种方法中，由于前者忽略了水的晃动及与固体的耦合作用，后者增加了结构的整体刚度，计算出的自振频率往往会偏高。为考查两种传统方法计算出的自振频率及地震响应的偏差，分别按以下三种方案进行了自振频率及地震响应谱分析计算：（1）将水按质量等效到渡槽两侧水作用的侧壁上，按纯结构进行计算；（2）将水等效成密度相等且刚度很小的固体材料；（3）利用 ANSYS 流固耦合功能进行计算。分析结果表明：

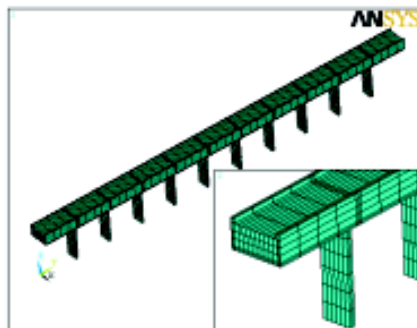


图 5.28 渡槽整体结构

情况 1 及 2 的自振频率分别比流固耦合的计算频率高出 19.6% 和 29.7%，应力结果分别高出 53.2% 及 51.4%，由此可看出传统的处理方法会对动力响应带来很大的偏差，对于渡槽等盛水结构采用流固耦合的动力分析法才能真实地反映水的存在对渡槽动力特性和地震响应的影响，而 ANSYS 的流固耦合分析功能可很好地解决这类动力问题。图 5.29 和 5.30 分别为情况 1 地震响应的主模态、频率和应力、变形情况；图 5.31 和 5.32 分别为情况 3 地震响应的主模态、频率和应力、变形情况。



图 5.29 情况 1 地震响应的主模态及频率

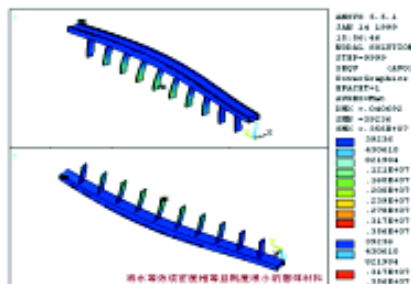


图 5.30 情况 1 对应的应力和变形

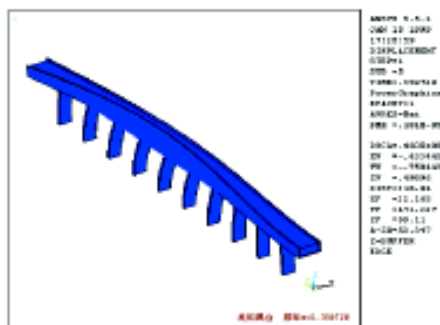


图 5.31 情况 3 地震响应的主模态及频率

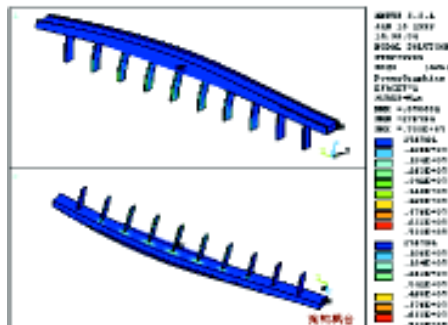


图 5.32 情况 3 对应的应力和变形

ANSYS 具有强大的接触功能，可以处理二维和三维任意表面的接触问题。

某钢筋混凝土渡槽 如图 5.33。钢筋混凝土是一种非线性材料，渡槽又是靠接触搁在支撑柱上的，对于这种复合非线性静力问题，ANSYS 也可以轻松处理。用 ANSYS 的非线性接触分析功能可以很方便地确定出渡槽与支撑柱间的接触程度、接触面的大小、接触应力的分布，并可在在此基础上进行优化设计。

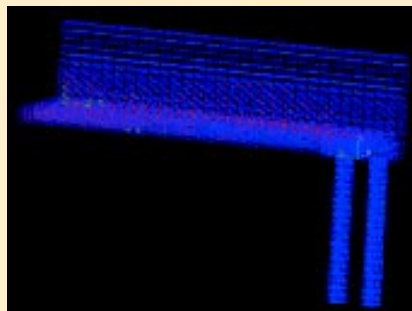


图 5.33 钢筋混凝土渡槽

南水北调工程 该工程是跨流域的巨型工程，其渡槽的设计流量在黄河以南达 $500 \sim 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，是一超大型渡槽结构。对于这样的超大型渡槽，无先例可循，也没有设计规范可依。需进行结构设计理论的探索和研究，为此，武汉大学土木建筑工程学院采用 ANSYS 进行了这方面研究。通过大量的计算比较和结构优化分析，提出了多厢连梁式三向预应力的新型结构型式。并在此基础上，对渡槽进行了具体的结构设计和预应力配筋计算。在预应力计算中，考虑了预应力损失。图 5.34 为该渡槽位移分布图，图 5.35 为应力分布情况。

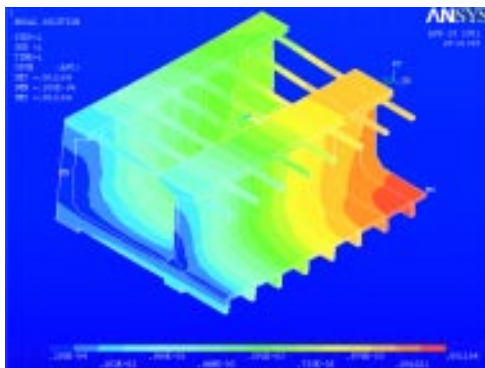


图 5.34 南水北调渡槽位移分布

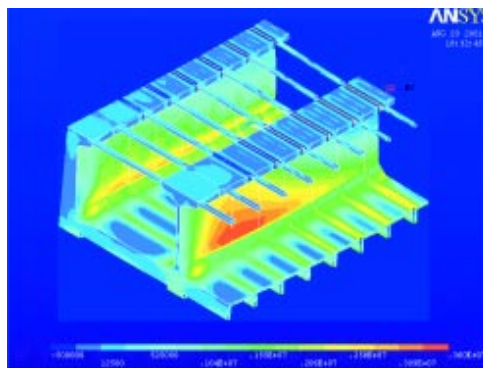


图 5.35 南水北调渡槽应力分布

五、ANSYS 在孔闸工程加固中的应用

加固是一类特殊结构，需对结构进行二次受力分析。由于原结构的承载能力不足，才要进行加固，其应力应变水平一般都很高。然而，加固体一开始并不立即分担荷载，而是在新增荷载下，即第二次加载情况下，才开始受力。这样，整个加固结构在其后的二次荷载受力过程中，新加部分的应力、应变始终滞后于原结构的累计应力、应变。如何充分发挥加固的作用，则需在建立计算模型时对这种顺序受力进行仿真。同时，加固结构本质上与原结构一起形成了一种二次组合结构，新旧两部分结构存在整体工作共同受力问题。整体工作的关键，取决于结合面的状况，所以必须进行界面分析。

临淮岗孔闸工程 该工程为一大型水闸结构，由于施工质量问题，需对之进行结构加固处理，并进行7度地震下的抗震分析。用 ANSYS 对该项目进行分析，即采用虚拟的时间步区分了原结构与加固结构的二次受力过程，采用接触单元和界面连接单元反映了新旧结构的界面连接状况，较充分地描述了结构加固工程的特点，所得结果合理。计算结果被用于该工程的加固设计与施工中，取得良好的经济效益。图5.36为孔闸刚建成总位移图，图5.37为地震作用下第一主应力分布。

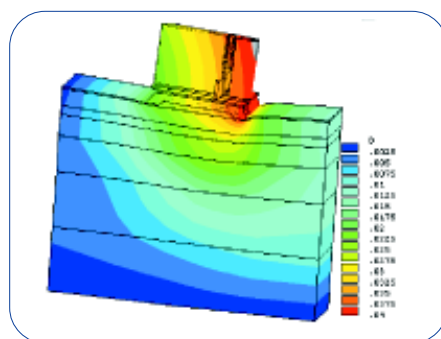


图 5.36 孔闸刚建成总位移图

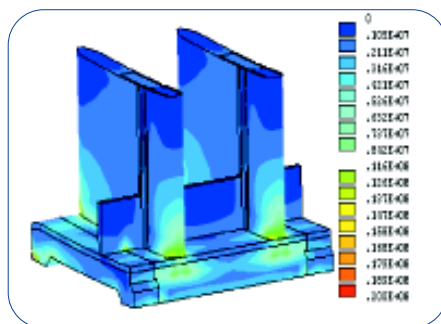


图 5.37 地震作用下第一主应力