

某碾压混凝土重力坝静动力响应有限元分析

疏永康 沈振中*

河海大学水利水电学院 江苏 南京 210098

摘要: 在高地震烈度区复杂地基上修建碾压混凝土重力坝, 需要特别关注其静动力特性及抗震安全性能。针对我国西部某水库工程, 采用三维有限元法和ABAQUS软件, 建立了碾压混凝土重力坝溢流坝段的三维有限元模型, 计算了设计规范要求的静力作用和地震作用工况下溢流坝段的应力和位移, 分析了坝体应力和位移的变化规律, 评价了该坝段的抗震安全性。结果表明, 静力作用下坝体和坝基应力满足规范要求, 设计地震和校核地震工况下坝踵最大拉应力分别为1.060MPa和1.925MPa, 坝趾最大压应力分别为4.086MPa和3.552MPa, 拉应力区范围小于坝基面7%, 压应力小于材料的允许强度, 应力满足规范要求。溢流坝段的结构设计是合理的。

关键词: 碾压混凝土重力坝; 有限元法; 静动力响应; 抗震安全性

DOI: <https://doi.org/10.37155/2717-5251-0307-11>

1 引言

在复杂地质条件和高地震烈度区建设水库工程, 混凝土坝的静动力响应特性及抗震安全性尤其受到重视。在强烈地震作用下, 混凝土坝容易出现一些安全问题, 如出现裂缝、失稳甚至溃坝等。因此, 针对复杂工程条件下混凝土重力坝的静动力响应分析具有重要意义。

应力分析方法可总结为模型试验和理论计算两大类。近年来, 随着计算机技术的普及和发展, 基于弹性理论的三维有限元法被广泛应用于应力和位移计算。1992年, 吴旭光等^[1]对三峡水利枢纽的厂房坝段进行三维静动力分析, 分析了发电孔洞、坝踵、坝趾以及发电管道上下弯道处的应力分布。2016年, 张兰等^[2]分析了永定桥碾压混凝土重力坝在两种不同缝布置下碾压混凝土重力坝的动力特性和地震动力响应。2016年, 吴海林等^[3]采用三维有限元法计算了某重力坝溢流坝段在正常蓄水位、设计洪水位、正常蓄水位及地震共同作用三种工况下的应力、位移状况。2019年, 赖宏^[4]采用三维有限元法进行了某水库拱坝的体型设计和应力分析。2021年, 冯天骏和陈阳^[5]通过三维有限元法对色拉龙一级水电站溢流坝段进行了整体的应力、变形位移的计算与分析, 探究了各工况下结构应力分布的一般规律和变形分布特点, 验证了溢流坝体型的合理性。

我国某碾压混凝土重力坝地处西部高地震烈度区, 坝高80m, 设计地震烈度为8度, 坝址区地形较破碎, 局部基岩裸露, 地质条件复杂, 且伴有断层。本文基于有限元法和ABAQUS软件, 针对该碾压混凝土重力坝, 建立典型溢流坝段的三维有限元模型, 计算分析在各种工况下坝体和坝基的应力和变形, 研究该坝段的静动力响应特性和抗震安全性, 论证大坝结构设计的合理性。

2 工程概况

我国西部某水库是集调运水力资源、提供电力资源, 防洪排涝等重要功能的水利枢纽工程, 拦河坝为碾压混凝土重力坝, 配备有消力池、泄洪孔及其他发电厂房设施等。工程等别为Ⅲ等中型, 主要建筑物为3级。正常蓄水位1432.00, 死水位1391.75m, 设计洪水位为1432.00m, 校核洪水位为1433.07m, 坝顶高程1435.00m, 坝顶宽11.0~25.5m, 最大坝高80.0m, 重力坝长331.30m, 坝顶长402.3m。坝体共分17个坝段, 左岸1~8号坝段为左岸挡水坝段, 9号坝段为中孔坝段, 10~11号坝段为表孔溢流坝段, 12~17号坝段为右岸挡水坝段。图1和图2分别为水电站上游立面图和溢流坝段横剖面图,

*通讯作者: 沈振中, 1968.3, 男, 汉族, 江苏南京, 教授, 博士生导师。研究方向: 水工结构安全评价与水工程安全管理。

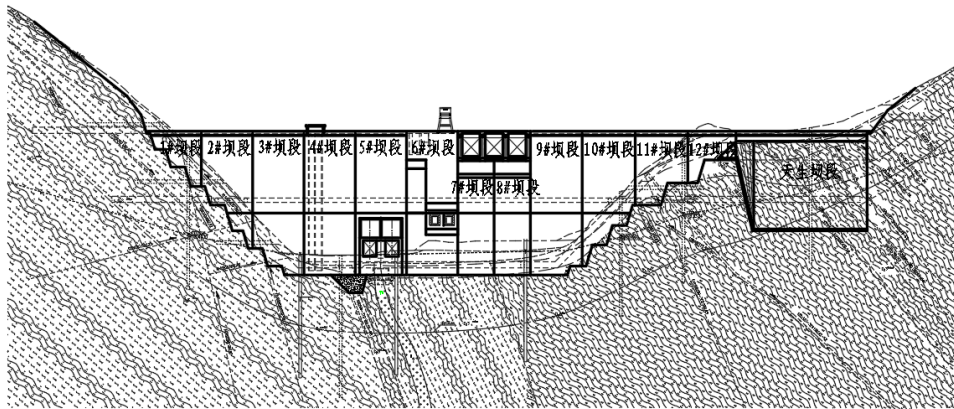


图1 碾压混凝土重力坝上游立面图

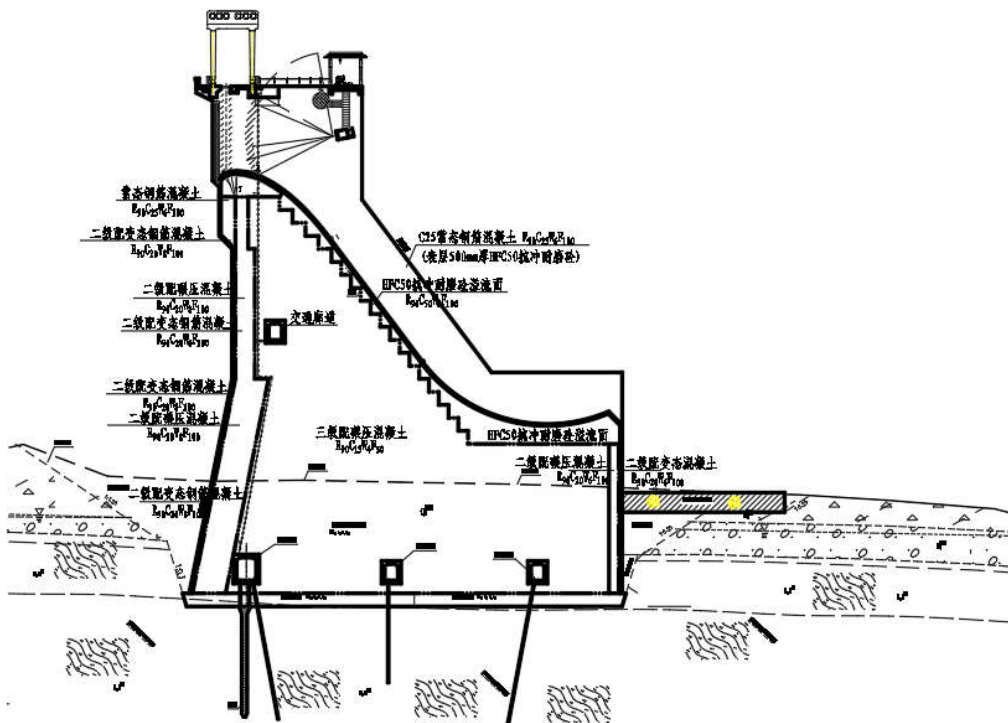


图2 溢流坝段横断面图

3 有限元模型

溢流坝段位于河床中部，相比其他非溢流坝段承受更高的静水压力，需要考虑溢流时在反弧段产生的动水压力。同时，它即作为挡水建筑物，又作为泄水建筑物，需要同时满足稳定、强度和水利条件的要求。

根据结构特性以及分析要求，有限元模型计算坐标系定义如下：X轴正向为从上游指向下游方向；Y轴平行坝轴线，其正向为从河流左岸指向右岸方向；Z轴正向为竖直向上方向。

计算模型的边界范围如下：在X轴向，坝踵往上游及坝趾往下游各截取1.5倍坝高，共计387.6m；在Y轴向，取全部溢流，即坝轴线向长度41m；在Z轴向，从坝顶截至坝基面以下2倍坝高，共计240.0m。

计算时，模型截取边界底部为固定约束，上、下游x向约束，侧面y向约束。

溢流坝段的计算模型有限元网格如图3所示，其中单元结点数为13040个，单元数为10261个。选择应力和位移较大的结构部分进行应力分析，主要包括坝踵、坝趾、上下游折坡、坝顶及其他关键点。

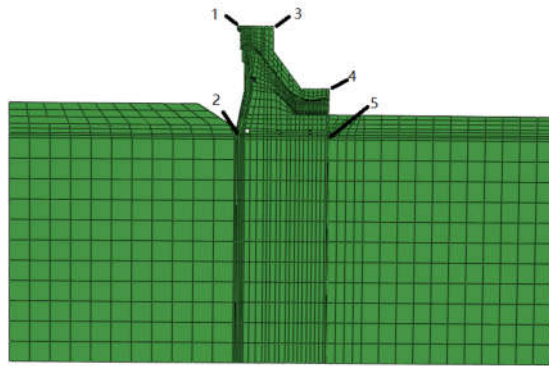


图3 溢流坝段有限元模型

4 计算参数和工况

4.1 计算参数

根据设计资料，溢流坝段共有7个分区。坝基岩体分为2个不同区域。各分区材料参数如表1所示。

表1 坝体混凝土分区及坝基岩体分区材料参数

| 分区编号 | 分区描述 | 弹性模量/(MPa) | 泊松比 | 密度/(Kg/m ³) | 凝聚力/(MPa) | 内摩擦角度 |
|------|---|------------|-------|-------------------------|-----------|-------|
| 混凝土1 | R ₉₀ C ₂₀ W ₈ F ₁₀₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土2 | R ₉₀ C ₂₀ W ₈ F ₁₀₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土3 | R ₉₀ C ₂₀ W ₆ F ₁₀₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土4 | R ₉₀ C ₁₅ W ₄ F ₅₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土5 | R ₉₀ C ₂₀ W ₄ F ₅₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土6 | R ₉₀ C ₂₀ W ₈ F ₅₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 混凝土7 | R ₉₀ C ₃₀ W ₄ F ₁₀₀ | 2.55E+04 | 0.167 | 2.448E+03 | — | — |
| 基岩1 | 混合岩化片岩B _{III} | 1.044E+04 | 0.28 | 2.7E+03 | 0.7 | 38.66 |
| 基岩2 | 绿泥云母片岩C _{IV} | 6.7E+02 | 0.28 | 2.5E+03 | 0.39 | 35.00 |

4.2 计算工况

根据SL319—2018《混凝土重力坝设计规范》^[6]，计算考虑将自重、上游静水压力、泥沙压力、坝底扬压力和地震动水压力、地震惯性力等^[7]作为溢流坝段所受的主要荷载。这里主、副排水孔的扬压力系数分别取为0.20和0.50。其中设计洪水位工况的上、下游水位分别为1432m、1365.16m（同正常蓄水位）；校核工况上下游水位分别为1433.07m、1373.75m；竣工工况（空库）上游水位和下游水位均不考虑；地震工况考虑正常蓄水时遭遇地震作用，即上、下游水位分别为1432m、1365.16m，水平向设计地震加速度代表值为0.2g。溢流坝段各计算工况对应的荷载组合见表2。

表2 溢流坝段各工况下的荷载组合

| 荷载 \ 工况 | 工况 | | | | |
|---------|-----|-------|-------|------------|------------|
| | 竣工期 | 设计洪水位 | 校核洪水位 | 正常蓄水位+设计地震 | 正常蓄水位+校核地震 |
| 自重 | √ | √ | √ | √ | √ |
| 静水压力 | - | √ | √ | √ | √ |
| 坝基扬压力 | - | √ | √ | √ | √ |
| 泥沙压力 | - | √ | √ | √ | √ |
| 地震动水压力 | - | - | - | √ | √ |
| 地震惯性力 | - | - | - | √ | √ |

5 静力响应分析

5.1 位移特征

溢流坝段在竣工期和校核洪水工况下的顺河向位移和竖直向位移分布情况如图4、图5所示。从图中可以看出，两

种静力工况下，坝体模型顺河谷方向位移随坝体高度增加而增大，且位移等值线呈现层状分布，同一水平面位移差别不大。

溢流坝段模型整体最大顺河向位移在校洪水位核工况下最大，其值为5.005mm，出现部位为坝顶处。这主要是因为校核洪水工况下上游水位最高，加之在上游面上的水重最大，因此校核洪水工况下顺河向位移较大。

最大竖向位移在竣工工况下最大，其值为-6.159mm，出现在溢流坝段的坝顶处。这主要是因为竣工期工况下上游无水，加之坝基岩石多为混合岩化片岩，强度较低，河床倾向负Z向，因此坝顶处的负Z向位移较大。

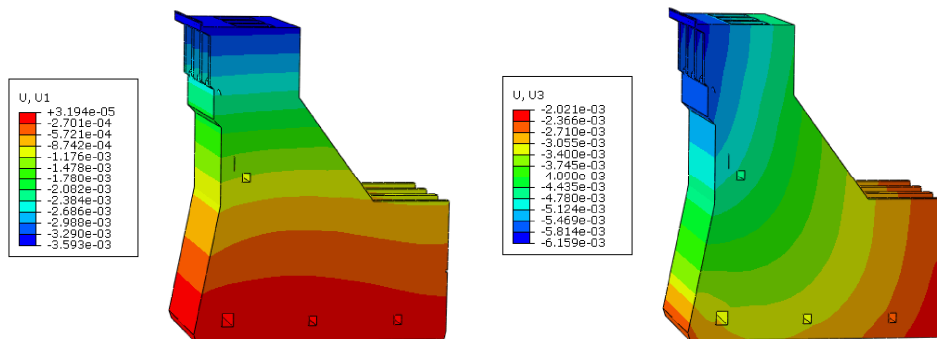


图4 溢流坝段竣工期U₁、U₃位移分布图

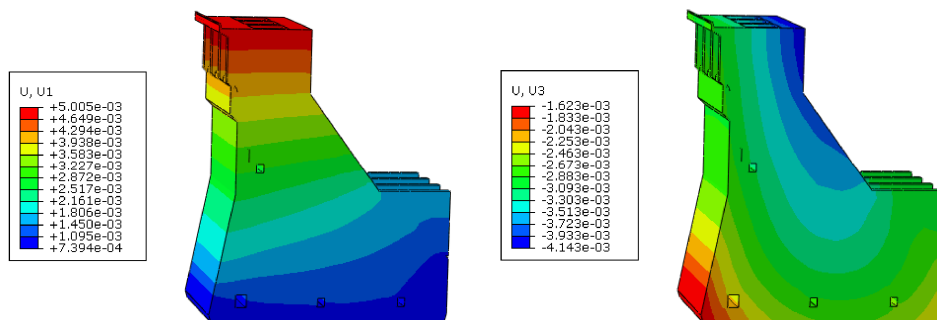


图5 溢流坝段校核洪水工况U₁、U₃位移分布图

5.2 应力特征

溢流坝段在竣工期、设计洪水工况和校核洪水工况下的顺河向位移和竖向位移分布情况如图6、图7、图8所示。结果表明，溢流坝段模型整体最大第一主应力在校核洪水位工况下坝体上游坝踵处最大，其值为0.6777MPa。这一方面是因为在该工况下上下游水位差最大；另一方面，坝踵处在有限元分析中易出现应力集中的现象，坝踵拉应力区范围较小，基本在1m高度范围内。

最大第三主应力在校核洪水工况下最大，其值为-4.943MPa，出现在坝趾极小部位。这是因为在校核洪水工况下上游水位最高，造成坝趾处压应力最大，坝踵拉应力最大。该值远小于坝踵处岩体的抗压强度9.6MPa，因此整体模型的第三主应力满足岩体抗压强度要求。

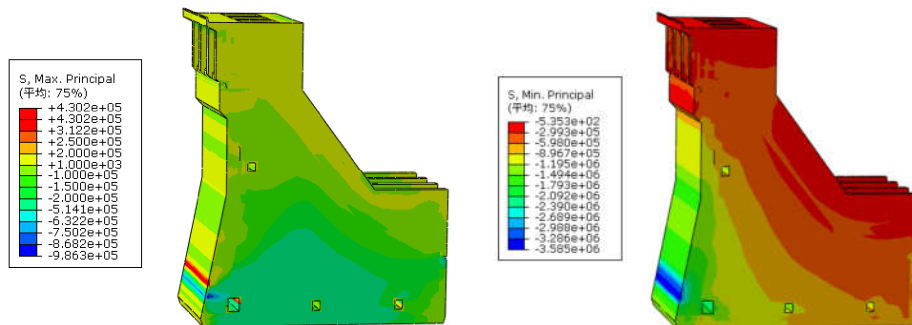


图6 溢流坝段竣工期第一、三主应力分布图

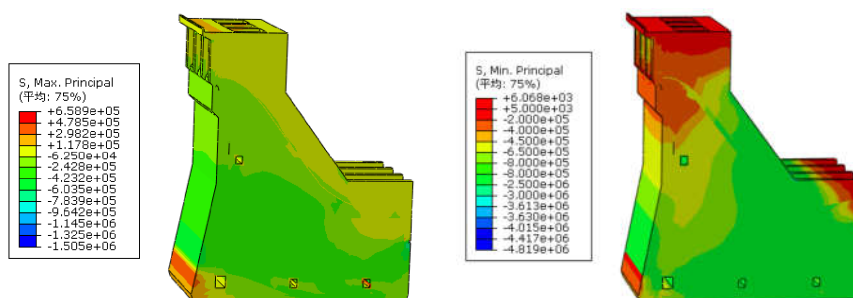


图7 溢流坝段设计洪水工况第一、三主应力分布图

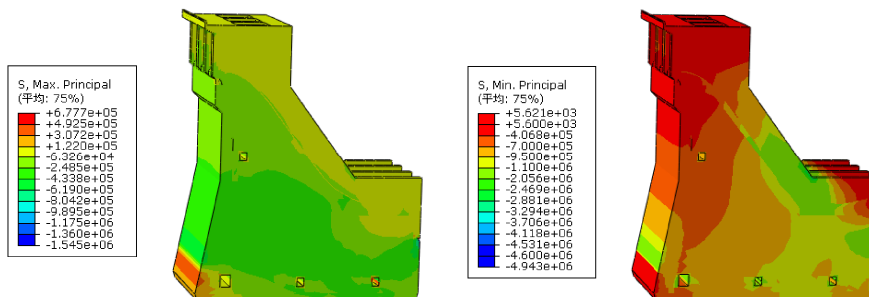


图8 溢流坝段校核洪水工况第一、三主应力分布图

6 动力响应分析

6.1 自振特性分析

溢流坝段进行自振特性分析的主要目的是获得结构在动载荷作用下的振动特性，即固有频率和振型。

动水压力的简化采用附加质量法^{[8][9]}，在进行振型分解反应谱法^[10]分析前，首先提取附加质量法溢流坝段坝体的前10阶自振频率。溢流坝段模态分析结果见表3。根据设计规范，混凝土的阻尼比为0.05。在考虑地震作用对坝体的作用时，可以忽略地震作用效应小于5%的高阶振型。

根据规范和坝址区地质条件，水库挡水建筑物在设计工况下的地震动峰值加速度为208gal，校核工况下的地震动峰值加速度为282gal，竖向输入地震动加速度曲线取水平方向的2/3。

表3 溢流坝段各工况下的荷载组合

| 阶数 | 固有频率/Hz | 自振周期/s | 振型描述 |
|----|---------|--------|-----------------|
| 1 | 3.7620 | 0.533 | 坝体上中部沿正X向偏移 |
| 2 | 4.0579 | 0.427 | 坝体倾向下游，但未出现沉降 |
| 3 | 4.7855 | 0.357 | 坝体倾向上游，顶部有所上升 |
| 4 | 5.1543 | 0.348 | 坝体倾向上游，有沉降 |
| 5 | 5.4922 | 0.317 | 坝体稍倾下游，但未出现沉降 |
| 6 | 7.3391 | 0.272 | 坝体上部倾向下游 |
| 7 | 7.4509 | 0.321 | 坝体倾向下游，稍有沉降 |
| 8 | 8.5451 | 0.223 | 坝体上部稍倾向下游，有较大沉降 |
| 9 | 9.0999 | 0.215 | 坝体倾向下游，但未出现沉降 |
| 10 | 9.7979 | 0.193 | 坝体上部沿略倾向下游 |

6.2 位移特征

设计地震工况和校核地震工况坝体的位移响应分布规律一致，作为示例，图9为设计地震工况下顺河谷向和竖向往位移响应分布图。从图中可以看出，设计地震工况下顺河向位移响应最大值发生在坝顶，为5.173mm，位移随高程升高而增大，同一水平面，坝体各点水平位移响应十分接近。最大竖向往位移响应发生在坝顶上游面，为2.505mm，竖向往位移响应上游面大于下游面，即随溢流坝段顺河向逐渐减小。校核地震工况时，最大顺河向位移响应发生在坝顶，

为9.729mm，最大竖直向位移发生在坝顶上表面，为4.440mm。

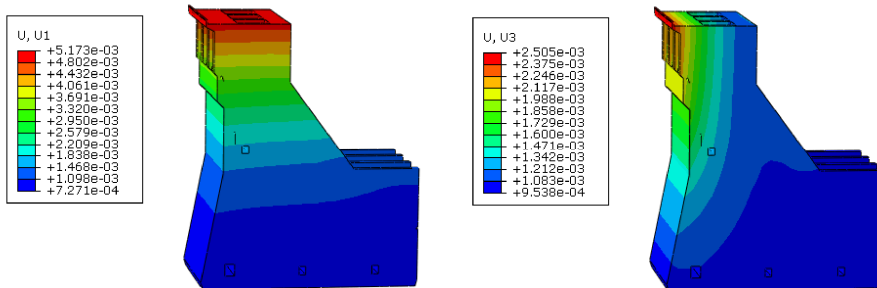


图9 溢流坝段设计地震工况U₁、U₃位移分布图

6.3 应力特征

设计地震工况和校核地震工况坝体的位移响应分布规律一致，作为示例，图10为设计地震工况下第一和第三主应力响应分布图。从图中可以看出，设计地震工况第一主应力基本以拉应力为主。动静叠加第一主应力后最大拉应力值为1.060MPa。除下游折坡和坝踵小区域外，大部分区域的拉应力都小于1MPa。坝踵混凝土为坝体上表面防渗体二级配变态钢筋碾压R90C20W8F100，其轴心抗拉强度设计值为1.10MPa，此处的最大拉应力小于轴心抗拉强度设计值，因此第一主应力满足抗拉强度要求。坝踵处动静叠加第三主应力后最大压应力值为4.086MPa。相应部位材料的轴心抗压强度设计值为9.60MPa，此处的最大压应力小于轴心抗压强度设计值，因此第三主应力满足抗压强度要求。校核地震工况下应力计算结果小于材料强度设计值，满足规范要求。

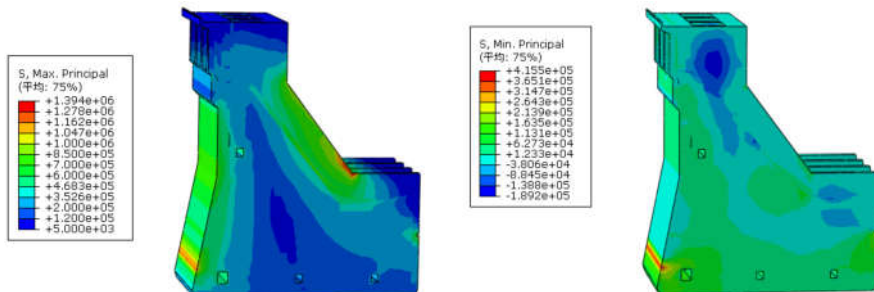


图10 溢流坝段设计地震工况S₁、S₃应力分布图

7 抗震安全评价

7.1 静力分析

建立了溢流坝段的三维有限元模型，进行线弹性应力变形计算，分析了竣工期和运行期坝体的变形和应力及其分布规律。结果表明，溢流坝段模型的位移和应力数值不大，最大顺河向位移出现在校核洪水工况下坝顶处，其值为5.005mm；最大垂直位移出现在竣工工况下坝顶处，其值为-6.159mm；最大第一主应力出现在校核洪水工况下上游坝踵处，其值为0.6777MPa；最大第三主应力出现在校核洪水工况下坝址处，其值为-4.943MPa。应力均小于相应部位材料的强度设计值，结果满足规范要求。静力工况应力计算成果汇总如表4所示。

表4 静力工况应力计算成果汇总表

| 工况 | 第一主应力S ₁ /MPa | 规范允许值S ₁ /MPa | 第三主应力S ₃ /MPa | 规范允许值S ₃ /MPa | 拉应力区竣工期 |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| | 0.4302 | 1.10 | -3.585 | 9.60 | < 7% |
| 正常蓄水 | 0.6589 | 1.10 | -4.819 | 9.60 | < 7% |
| 校核洪水 | 0.6777 | 1.10 | -4.943 | 9.60 | < 7% |

7.2 动力分析

采用反应谱法计算了溢流坝段的三维线弹性动力响应，进行动静叠加，分析坝体在设计 and 校核地震作用下的位移反应和应力反应及其分布规律，应力计算成果汇总如表5所示。结果表明，设计地震和校核地震工况下的第一主应力较正常蓄水土况分别增加了61%和192%，第三主应力较正常蓄水土况分别增加了-15%和-26%。坝体模型在设计地震

和校核地震工况下的第一和第三主应力均小于相应部位材料的拉、应力强度设计值，因此，应力满足规范要求。

表5 动力工况应力计算成果汇总表

| 工况 | 第一主应力 S_1 /MPa | 规范允许值 S_1 /MPa | 第三主应力 S_3 /MPa | 规范允许值 S_3 /MPa | 拉应力区 |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|
| 设计地震 | 1.060 | 1.10 | -4.086 | 9.60 | < 7% |
| 校核地震 | 1.925 | 1.10 | -3.552 | 9.60 | < 7% |

8 结论

针对我国西北地区某碾压混凝土重力坝地质条件复杂、坝址区地震烈度高的特点，采用ABAQUS软件建立溢流坝段三维有限元模型，分析了该坝段在三种静力工况和两种动力工况下的应力和位移响应，评价了该坝段的抗震安全性。

(1) 静力作用下，溢流坝段位移符合重力坝位移响应的一般规律。顺河向位移随高程升高而增大，同一水平面，坝体各点水平位移响应十分接近。竖向位移响应上游面大于下游面。溢流坝段整体最大第一主应力在校核洪水水位工况下最大，其值为0.6777MPa，出现在坝体上游坝踵处。最大第三主应力在校核洪水工况下最大，其值为-4.943MPa，出现在坝趾极小部位。拉、压应力均小于材料的允许强度，应力满足规范要求。

(2) 地震作用下，坝体最大顺河向动位移出现在校核地震工况下坝顶处，同一高程水平面上，沿坝轴线方向的各点水平位移基本一致，而各点的竖向位移则自上游面向下游面逐渐减小。有限元计算结果表明，设计地震和校核地震工况下坝踵最大拉应力分别为1.060MPa和1.925MPa，坝趾最大压应力分别为4.086MPa和3.552MPa，拉应力区范围小于坝基面7%，压应力小于材料的允许强度，应力满足规范要求。溢流坝段的结构设计是合理的。

(3) 本工程属于高碾压混凝土坝。通过有限元法静动力响应分析，表明在静力工况和动力工况下，该重力坝溢流坝体结构设计是合理的，但坝踵和坝趾区域为应力薄弱点，运行时需加以关注。

参考文献：

- [1]吴旭光,马贞信.三峡厂房坝段三维静动力分析[J].河海大学学报,1992,20(5):112-118.
- [2]张兰,张继勋,孙永明等.永定桥碾压混凝土重力坝三维有限元动力分析[J].人民珠江,2016,37(7):61-65.
- [3]吴海林,郑志强,杨中,等.溢流重力坝三维有限元分析[J].水电与新能源,2016,(11):1-8.
- [4]赖宏.水库拱坝三维有限元分析及设计优化[J].陕西水利,2019,(09):32-40.
- [5]冯天骏,陈阳.色拉龙一级水电站溢流坝段三维有限元静力分析[J].水电站设计,2021,37(02):68-71.
- [6]SL319-2018.混凝土重力坝设计规范[S].
- [7]GB51247-2018.水工建筑物抗震设计标准[S].
- [8]Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes.[J].Transactions of the American Society of Civil Engineers,1933,98(2):418-432.
- [9]Alembagheri M,Ghaemian M.Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2013,42 (1):123-144 .
- [10] Javanmadi,Farrokhi.Seismic assessment of concrete gravity dam considering transientPuliftPerssuersineareks.[J].Engineering Sturctuers,2005,27(4):616-628.