

上-下部结构相互作用对水电站厂房 地震响应的影响研究

张剑峰, 宋志强, 王飞, 朱少坤, 王娟

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了探究上-下部结构相互作用对水电站地面厂房地震响应的影响, 基于工程实例, 针对当前普遍应用的简化分析方法, 确定了4种方案对比分析下部结构的放大效应、上下部结构的耦联以及下部结构混凝土材料采用线弹性本构模型对厂房结构地震响应的影响。结果表明: 不考虑下部结构放大效应或者不考虑上下部结构耦联会使厂房结构的地震响应偏小且偏差较大, 据此设防将不利于结构的抗震安全; 不考虑下部结构混凝土材料的塑性力学行为时, 厂房结构的地震响应偏大但较为接近真实值, 进一步比较结构的各项能量分配和受拉损伤演化过程, 此方案上部结构的塑性变形耗能和损伤耗能均减小, 损伤范围也减小, 下游墙体的损伤程度却更为严重, 但结构破坏模式相似, 均为上下部结构的相交部位发生损伤破坏, 所以认为应用此方法做抗震简化分析能够较为准确地反映上-下部结构的相互作用, 并且有利于水电站地面厂房的抗震安全。

关键词: 上-下部结构相互作用; 水电站地面厂房; 地震响应; 能量分配; 结构损伤

中图分类号: TV731; TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0186-08

Effect of interaction between superstructure and substructure on the seismic response of hydropower station plant

ZHANG Jianfeng, SONG Zhiqiang, WANG Fei, ZHU Shaokun, WANG Juan

(Faculty of Water Resource and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the influence of the interaction between superstructure and substructure on the seismic response of ground plant of hydropower station and aiming at the simplified analysis method widely used in seismic research at present, four schemes were selected to compare and analyse the influence of the amplification effect of the substructure, the coupling of the superstructure and substructure, and the linear elasticity model for concrete materials of the substructure on the seismic response of hydropower station plant based on engineering examples. The results showed that the seismic response of the powerhouse structure will be smaller and deviate greatly without considering the amplification effect of the substructure or the coupling of the superstructure and substructure, which will not be conducive to the seismic design of the structure, so it should be considered in the seismic analysis. The seismic response of powerhouse structure is larger but closer to the true value without considering the plastic mechanical behavior of the concrete material of the substructure. Further comparison of the energy distribution and damage evolution process of the hydropower station plant structure showed that the plastic deformation energy, the damage energy of the superstructure, and the damage region reduced. The damage of the downstream wall was more serious, but the failure models of the structure were similar, both are damaged at the intersection part of superstructure and substructure. Therefore, it is considered that the simplified seismic analysis with this method can reflect the interaction between superstructure and substructure more accurately, and it is also conducive to the seismic safety of ground plant of hydropower station.

Key words: the interaction between superstructure and substructure; ground plant of hydropower station;

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479165)

作者简介: 张剑峰(1990-), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要从事水工结构抗震研究。

通讯作者: 宋志强(1981-), 男, 辽宁开原人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构抗震和水电站厂房机组振动研究。

seismic response; energy distribution; structural damage

1 研究背景

不同于一般的工业民用建筑,水电站厂房需承担利用水能发电的任务,通常在竖向以发电机层为界分为上部结构和下部结构,上部类似于单层厂房结构体系,下部为大体积混凝土结构,用于布置过流系统,上、下部结构的质量和刚度存在很大的差异,而且上部结构跨度大、高度高,在地震作用下,上部结构往往由于“鞭梢效应”响应显著^[1-2]。

我国水能资源多集中在地震频发的西部地区,地震作用下极易引起厂房结构的振动,当振动产生的动应力超过结构抗力时将导致结构物的损坏,直接危及人员安全和电力供应,所以对于水电站厂房的抗震安全研究从未间断。张辉东等^[3]采用时程分析法并考虑混凝土材料的非线性力学特性对坝后式水电站厂房进行抗震分析,得出了厂房结构响应和裂缝随时间变化的全过程,并提出在坝后式厂房抗震分析时可在上部结构底部施加固定边界单独分析,即忽略下部结构对地震动的放大效应。郝军刚等^[4]从混凝土损伤、钢筋应力、层间位移和网架受力4个方面研究了在罕遇地震动作用下水电站厂房结构的抗震性能,发现厂房结构整体破坏程度处于“可修”水平,而上下游墙在顺河向的不协调运动有使网架发生垮塌的风险,但是分析时仅将水电站厂房上部结构墙柱考虑为弹塑性,下部结构混凝土则按线弹性考虑。苏晨辉等^[5]以软弱基岩上的河床式水电站为例,采用反应谱法分析了水工抗震规范中设计反应谱特征周期和下降段衰减系数调整对厂房结构地震动响应的影响,结果表明按照变动后反应谱计算得到的结构地震响应明显增大。张汉云等^[6]基于河床式水电站厂房的整体和局部模型,混凝土材料采用线弹性本构关系,通过输入顺河向的地震动,研究了上部结构的“鞭梢效应”以及上部结构对下部结构地震响应的影响。张启灵等^[7]则对屋顶与排架柱的连接方式对水电站厂房地震响应的

影响做了研究,发现对于尾水平台较高且主副厂房之间无分缝的水电站厂房,屋顶简支相对于铰接的连接方式对上部结构的抗震更为有利。文献[7-8]分别从结构地震响应和能量分配的角度,通过计算分析得出了合理地设置黏滞阻尼器可以增强水电站厂房结构抗震能力的结论。

当前的研究普遍认为水电站地面厂房上部结构更容易发生震损,且在顺河向的地震响应最大,所以多数抗震研究基于节约计算成本的目的只是做简化分析,但是此类方法往往难以准确地反映厂房上-下部结构间的相互作用,将导致地震响应计算结果存在偏差,进而影响结构的抗震设计。本文基于某水电站地面厂房工程实例,输入三向地震动,探究在地震作用下水电站厂房下部结构的放大效应、上下部结构的耦联和下部结构混凝土材料采用线弹性本构模型对厂房地震响应的影响,并从能量分配和结构损伤的角度探究下部结构混凝土材料采用线弹性本构时厂房结构地震损伤模式与真实情况的差异。

2 有限元计算模型

基于某大型水电站坝后式厂房工程实例,选取中间标准机组段,利用ABAQUS程序建立厂房-地基系统的三维有限元模型,厂房上部结构型式为上下游实体墙加钢屋架,在横河向,不考虑相邻机组段之间的相互作用,厂房两侧设为自由边界,地基深度取70m,上下游方向和横河向均延伸70m,见图1。在地基截断边界上施加弹簧阻尼器单元构成黏弹性人工边界^[9],以模拟半无限地基的弹性恢复作用和辐射阻尼效应。厂房大部分混凝土结构及地基采用六面体实体单元C3D8模拟,发电机层楼板、副厂房楼板、风罩、钢蜗壳、尾水管和机井里衬采用S4壳单元,钢屋架采用T3D2桁架单元,梁、柱采用B33梁单元模拟,水轮发电机组及吊车重量、屋面荷载和动水压力等以附加质量单元的形式施加于相应位置。

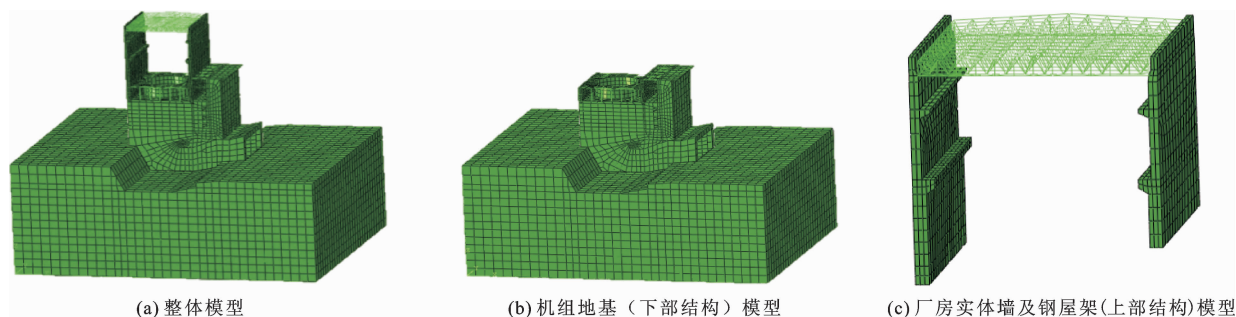


图1 水电站厂房-机组地基系统三维有限元计算模型

厂房混凝土材料的弹塑性力学行为用损伤塑性模型^[10-13]描述,钢结构和地基岩体则按线弹性考虑,厂房各部位材料的弹性力学参数见表 1。ABAQUS 中的损伤塑性模型(CDP 模型)是基于各向相同破坏假设,考虑了由于拉压塑性应变导致的弹性刚度退化以及循环荷载作用下的刚度恢复,适用于描述混凝土材料在地震荷载循环往复作用下弹塑性行为。依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[14],厂房结构 C25 混凝土动态强度取为相应的静态强度标准值,即抗压强度和抗拉强度。本构曲线和损伤因子曲线结合上述规范给出的单轴加载作用下的混凝土材料本构关系,利用能量等效假设计算得到。

表 1 水电站厂房各部位材料的弹性力学参数

部位	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
厂房混凝土结构	2500	28	0.167
钢结构	7850	200	0.280
地基岩体	2700	35	0.200

3 计算方案及地震动输入

为了探究简化分析方法所描述的上-下部结构相互作用对水电站厂房结构地震响应的影响,拟定了 4 种计算方案,主要区别在于计算模型、上下部结构混凝土材料本构关系、边界条件和地震动输入 4 个方面。方案 1 厂房上下部结构混凝土材料均按损伤塑性模型考虑且考虑了两者之间的耦联,能够准确地反映在地震作用时上下部结构之间相互作用,故作为真实情况,将其地震响应视为真实值;方案 2 未考虑下部结构混凝土材料的塑性力学行为;方案 3 未考虑上下部结构耦联,计算时采用局部模型,分为两步,步骤 1 的计算模型见图 1(b),通过输入三向地震动进行时程分析,读出发电机层楼板相应位

置的三向加速度时程,步骤 2 的计算模型见图 1(c),将步骤 1 中在发电机层楼板处读取的加速度时程在模型底部做三向输入进行时程分析;方案 4 则未考虑下部结构的放大效应。具体如表 2 所示。

选用黏弹性静-动统一人工边界^[15]综合考虑厂房-地基系统重力静力作用和地震动力作用,地震动输入通过在截断边界相应节点上施加等效节点力实现^[16]。地震动加速度时程记录根据场地特征按照《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247-2018)^[17]规定的标准设计反应谱拟合而成,该工程实例所在场地类别为 I_0 类,场地特征周期为 0.20 s,标准设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max} = 2.25$,顺河向和横河向地震动峰值加速度为 0.15 g,竖向地震动峰值加速度为 0.1 g,三者的相关系数分别为 0.08、0.10 和 0.05,均小于规定的限值 0.3,人工拟合地震波和方案 3 步骤 2 中上部结构输入地震动的各向加速度时程曲线如图 2 所示。

4 厂房结构地震响应分析

4.1 峰值加速度

各计算方案下水电站厂房上部结构和下部结构的各向峰值加速度如图 3,由图 3 可以看出,各方案顺河向的峰值加速度最大,横河向次之,竖向最小,其中上部结构在顺河向和横河向的峰值加速度远大于竖向,下部结构顺河向和横河向的峰值加速度相差较小。方案 2 上部结构在顺河向的峰值加速度相比方案 1 增大 14.3%,其他各向峰值加速度则较为接近,方案 3 在顺河向的峰值加速度大于方案 1,上、下部结构分别增大 34.5% 和 3.0%,其余各向峰值加速度均小于方案 1,表明不考虑上下部结构的耦联将会使顺河向的加速度偏大,其他向的加速度则偏小,方案 4 未考虑下部结构的放大作用导致上下部结构各向峰值加速度均偏小。

表 2 水电站厂房结构抗震计算方案

计算条件	方案 1	方案 2	方案 3		方案 4
			步骤 1	步骤 2	
计算模型	整体模型,上部结构、下部结构和地基,见图 1(a)	同方案 1	下部结构和地基,见图 1(b)	上部结构,见图 1(c)	上部结构,见图 1(c)
混凝土材料本构关系	上、下部结构均按损伤塑性本构关系	上部按损伤塑性模型,下部按线弹性模型	损伤塑性本构关系	损伤塑性本构关系	损伤塑性本构关系
边界条件	地基底面和侧面施加黏弹性人工边界	同方案 1	同方案 1	加速度边界	加速度边界
地震动输入	将人工波转化为等效节点力,采用三向输入	同方案 1	同方案 1	在模型底部三向输入步骤 1 中读取的加速度时程	在模型底部三向输入人工地震波

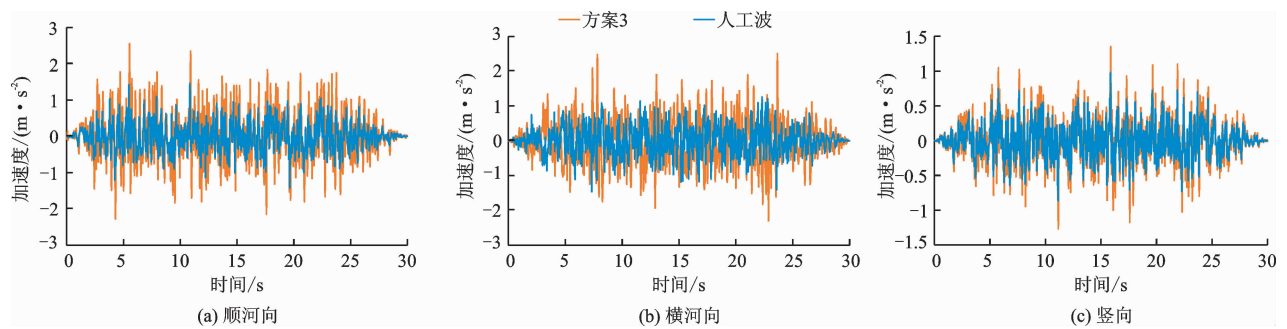


图 2 地震动各方向加速度时程曲线

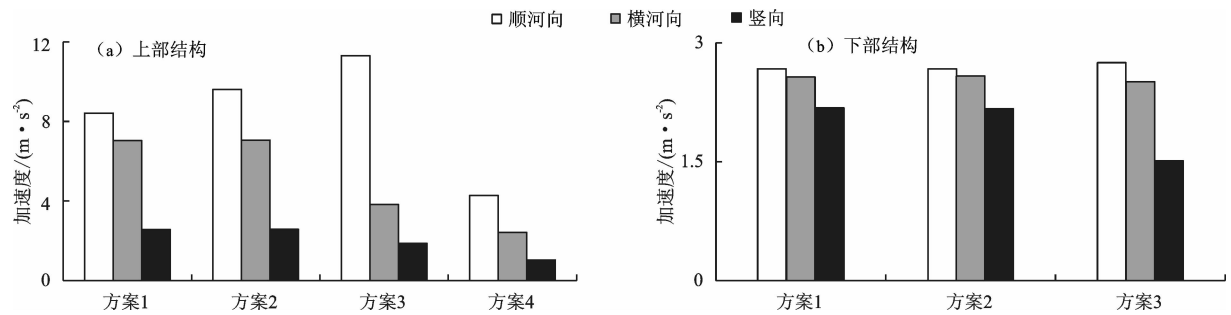


图 3 不同方案厂房上部 and 下部结构各方向峰值加速度

4.2 峰值位移

各计算方案上部结构及下部结构的峰值位移见表 3。由表 3 可看出,上部结构由于在顺河向的刚度远小于横河向和竖向,所以顺河向的位移峰值远大于后两者,在顺河向,方案 2 上部结构最大位移相比方案 1 增大 16.2%,方案 3 相比方案 1 减小 26.6%,方案 4 较方案 1 减小 40.7%;在横河向,方案 2 上部结构最大位移相比方案 1 增大 14.1%,方案 3 相比方案 1 减小 78.5%,方案 4 较方案 1 减小 84.0%;在竖向,方案 2 上部结构最大位移相比方案 1 增大 14.6%,方案 3 相比方案 1 减小 8.4%,方案 4 较方案 1 减小 12.4%。由此可见,将下部结构混凝土材料考虑为线弹性将增大上部结构的位移响应,而不考虑上下部结构耦联或不考虑下部结构的放大效应将会使位移峰值小于真实值。

表 3 各计算方案下厂房上、下部结构的各向峰值位移 mm

计算方案	上部结构			下部结构		
	顺河向	横河向	竖向	顺河向	横河向	竖向
方案 1	113.64	6.61	3.70	2.68	4.41	3.75
方案 2	132.02	7.54	4.24	2.74	4.56	3.78
方案 3	83.44	1.42	4.01	2.08	2.43	1.80
方案 4	67.44	1.06	3.24			

由于下部结构质量和刚度均较大,各向峰值位移均很小,方案 1 和方案 2 相同方向的峰值位移相差很小,均是后者的计算值略大于前者,而方案 3 的

各向峰值位移均小于真实值,呈现出和上部结构位移响应相同的规律。

4.3 结构应力

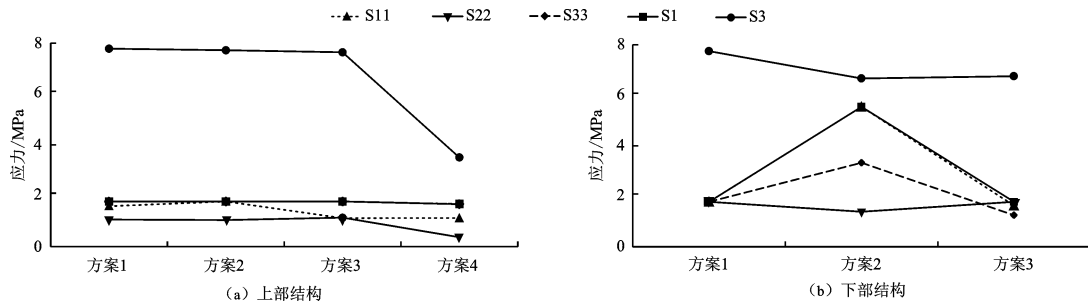
水电站厂房上部结构和下部结构在不同计算方案下的方向应力峰值见图 4。

由图 4(a)可知,对于上部结构,竖向的拉应力峰值在各方案下均较大,顺河向和横河向的拉应力则相对较小,方案 4 由于输入地震动的强度较低,各项应力值也相对较小。方案 1 计算得上部结构的顺河向拉应力峰值为 1.59 MPa,方案 2 为 1.78 MPa,相较方案 1 增加了 37.5%,表明将下部结构混凝土材料考虑为线弹性时将使顺河向的拉应力大于真实值,方案 3 顺河向拉应力峰值为 1.125 MPa,较方案 1 减少 29.5%,即不考虑上下部结构的耦联将会使顺河向的拉应力小于真实值。上部结构横河向的拉应力峰值在方案 1 和方案 2 时相差很小,分别为 1.07 和 1.05 MPa,方案 3 时则稍大于方案 1,为 1.15 MPa,可见上下部结构之间的耦联将在一定程度上减小上部结构的横河向的拉应力。竖向拉应力和第一主应力在前 3 种方案下均达到了结构的抗拉强度,方案 4 竖向拉应力和第一主应力均略小于结构的抗拉强度值。对于第三主应力,除方案 4 外,其他 3 种方案相差不大。

由图 4(b)可知,对于下部结构,方案 2 由于只考虑下部结构混凝土材料的线弹性力学行为,所以其顺河向和竖向的拉应力峰值以及第一主应力均超

过了混凝土材料的抗拉强度,而横河向的拉应力和第三主应力却小于真实值。各项应力在方案3时的

计算值均比真实值小,表明不考虑上下部结构耦联将使下部结构的应力值偏小。



注:图中 S11、S22、S33、S1、S3 分别代表顺河向拉应力峰值、横河向拉应力峰值、竖向拉应力峰值、第一主应力和第三主应力。

图4 不同方案厂房上部、下部结构各方向应力峰值

5 水电站厂房结构的能量特性及破坏模式分析

从水电站厂房结构的地震响应分析结果可知方案2与真实情况的偏差最小,下文将结合能量特性和结构损伤来探究在此方案下厂房结构的各项能量分配和地震破坏模式与真实情况的差异。结构体系在地震动作用下的运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为结构体系的质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{u}(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 和 $\{u(t)\}$ 分别为结构在地震动作用下相对地面的加速度、速度和位移; $\{\ddot{u}_g(t)\}$ 为地面运动加速度。

能量方程可由上式两端同时左乘 $\{\dot{u}(t)\}^T$, 并在地震动持时范围 $[0, T_d]$ 内积分, 可得:

$$\int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [M] \{\ddot{u}(t)\} dt + \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [C] \{\dot{u}(t)\} dt + \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [K] \{u(t)\} dt = - \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [M] \{\ddot{u}_g(t)\} dt \quad (2)$$

$$E_K + E_V + E_P + E_S = E_W \quad (3)$$

结构的总输入能:

$$E_W = - \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [M] \{\ddot{u}_g(t)\} dt \quad (4)$$

结构动能:

$$E_K = \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [M] \{\dot{u}(t)\} dt \quad (5)$$

结构阻尼耗能:

$$E_V = \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [C] \{\dot{u}(t)\} dt \quad (6)$$

结构塑性耗能和弹性应变能之和:

$$E_P + E_S = \int_0^{T_d} \{\dot{u}(t)\}^T [K] \{u(t)\} dt \quad (7)$$

ABAQUS 程序所采用的能量平衡方程是基于热力学第一定律,其形式与结构体系在地震动作用下运动方程积分后得到的能量方程(2)类似,由此可以通过 ABAQUS 输出地震作用下结构的各项能量^[8],不同的是采用损伤塑性模型(CDP 模型)时,塑性耗能可表示为公式(8),ABAQUS 中能量变量关键字与能量方程中的各项能量指标的对应关系见表4。

$$E_P = E_{PD} + E_{DMD} \quad (8)$$

表4 ABAQUS 能量变量关键字与能量方程中的各项能量指标对应表

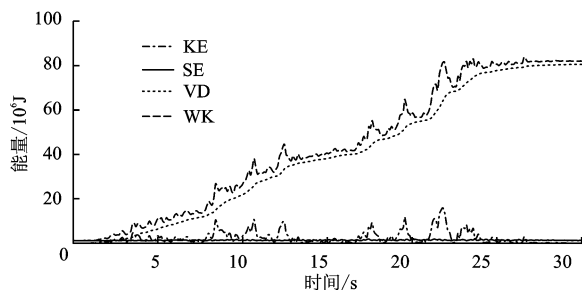
关键字	能量指标
结构变形中的弹性变形耗能 SE	E_S
结构变形中的塑性变形耗能 PD	E_{PD}
结构损伤耗能 DMD	E_{DMD}
结构黏性阻尼耗能 VD	E_V
结构动能 KE	E_K
总输入能 WK	E_W

图5为方案1和方案2下厂房结构整体的能量累积时程曲线,两者的总输入能相同,动能和弹性应变能只参与能量的转化而不会消耗能量,阻尼耗能、塑性变形耗能和损伤耗能则随着时间不断累计,其中阻尼耗能占总输入能的比重较大,两种方案下均占98.20%,为最主要的耗能方式。塑性变形耗能和损伤耗能表征结构产生塑性变形甚至发生损伤的范围和程度,两者占总输入能的比重较小,方案1塑性变形耗能约占0.23%,损伤耗能约占0.07%,方案2塑性变形耗能约占0.14%,损伤耗能约占0.04%。

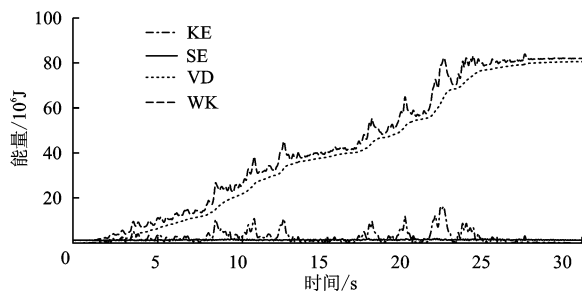
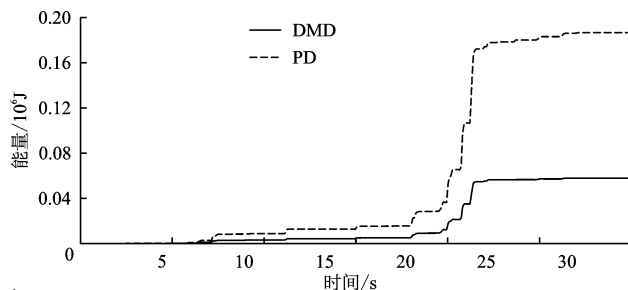
将整体的能量按上部结构和下部结构分解,上部结构的各项能量累积时程曲线如图6所示。由图6可知方案1和方案2下部结构的总能量远大于上部

结构,约占整体结构总输入能的88.3%,上部结构仅占11.7%,这主要是因为下部结构的质量和体积远大于上部结构,阻尼耗能较大,但在方案1时上部结构的塑性变形耗能和损伤耗能却大于下部结构,分别占整体塑性变形耗能和损伤耗能的71.4%和72.9%,表明上部结构发生塑性变形及损伤的范围或程度大

于下部结构。方案1中上部结构的塑性变形耗能和损伤耗能分别占上部结构总能量的1.39%和0.44%,方案2中塑性变形耗能和损伤耗能全部来源于上部结构,分别占上部结构总能量的1.18%和0.38%,表明将下部结构混凝土材料考虑为线弹性时上部结构的塑性变形耗能和损伤耗能减小。



(a) 方案1



(b) 方案2

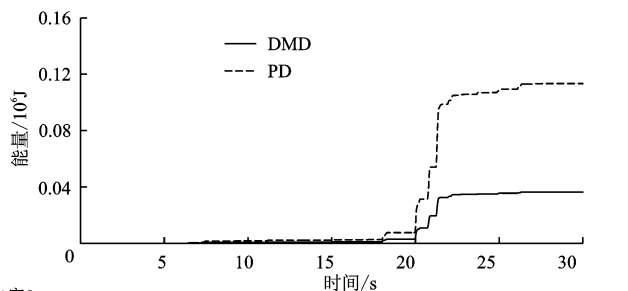
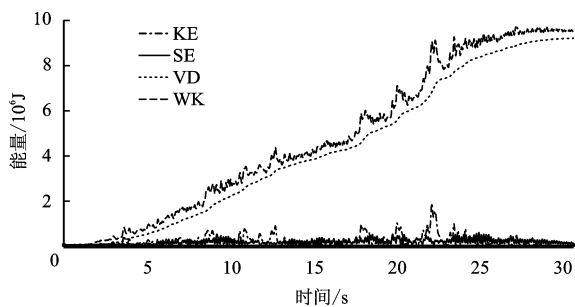
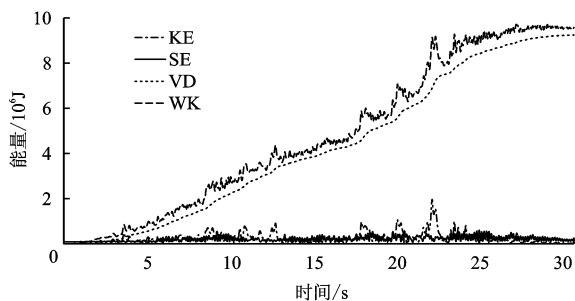
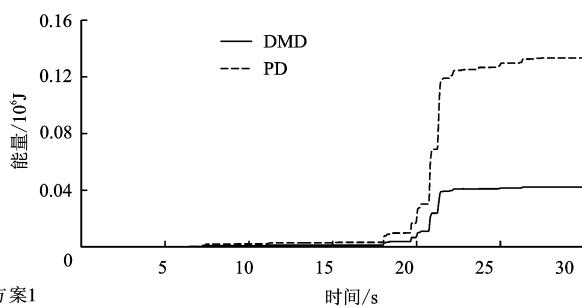


图5 厂房结构整体能量累积时程曲线



(a) 方案1



(b) 方案2

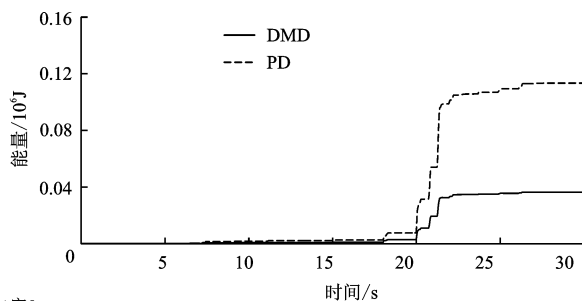


图6 厂房上部结构能量累积时程曲线

损伤耗能曲线出现阶跃表示结构的损伤演化,厂房结构在方案1下的受拉损伤演化过程见图7。由图7可看出,在地震作用6.4 s时,在发电机层楼板和上游墙的接触处、副厂房楼板部位率先出现损伤;7.2 s时发电机层楼板和上游墙的接触处的损伤

程度加大,开始出现裂缝;20 s时,下游墙与副厂房楼板接触部位也开始出现损伤,并沿墙体竖向发展;21 s时下游墙体外侧上层牛腿以下多数部位均出现不同程度的损伤;23 s时上游墙底的损伤开始向外侧扩展,下游墙与副厂房楼板接触部位出现裂缝;25

s 时上游墙底外侧产生不同程度损伤,但并未发生受拉破坏,下游墙受拉破坏范围则由外侧扩展至内侧,之后损伤不再发展。

在方案 2 下厂房下部结构混凝土材料按线弹性考虑,在地震作用下将只有上部结构发生损伤,其受拉损伤演化过程见图 8。由图 8 可看出,在 6.4s 时下游墙体内侧右墙角首先发生小范围损伤;7.2 s 时下游墙体外侧右墙角和上游墙体内侧两个墙角均出现损伤,范围较小;20.5 s 时上游墙体外侧底部也出现小范围的损伤,下游墙体内侧的损伤范围扩展至

整个底部,并开始在墙体底部右侧出现裂缝;22.0 s 时上游墙体内侧底部的损伤开始向厂房纵向和竖向发展,下游墙体裂缝则由墙体内侧扩展至外侧,下层牛腿上部也出现了大范围的损伤;23 s 时下游墙体内侧的损伤程度进一步加深,开始沿墙体竖向扩展,裂缝发展至整个墙体底部;25 s 时下游墙体外侧裂缝进一步扩展墙体底部的中间位置,之后损伤不再发展。可见上游墙只在墙体与发电机层接触位置发生有限范围的损伤,并未发生破坏,而下游墙则发生较大范围的损伤,并在墙体底部产生破坏。

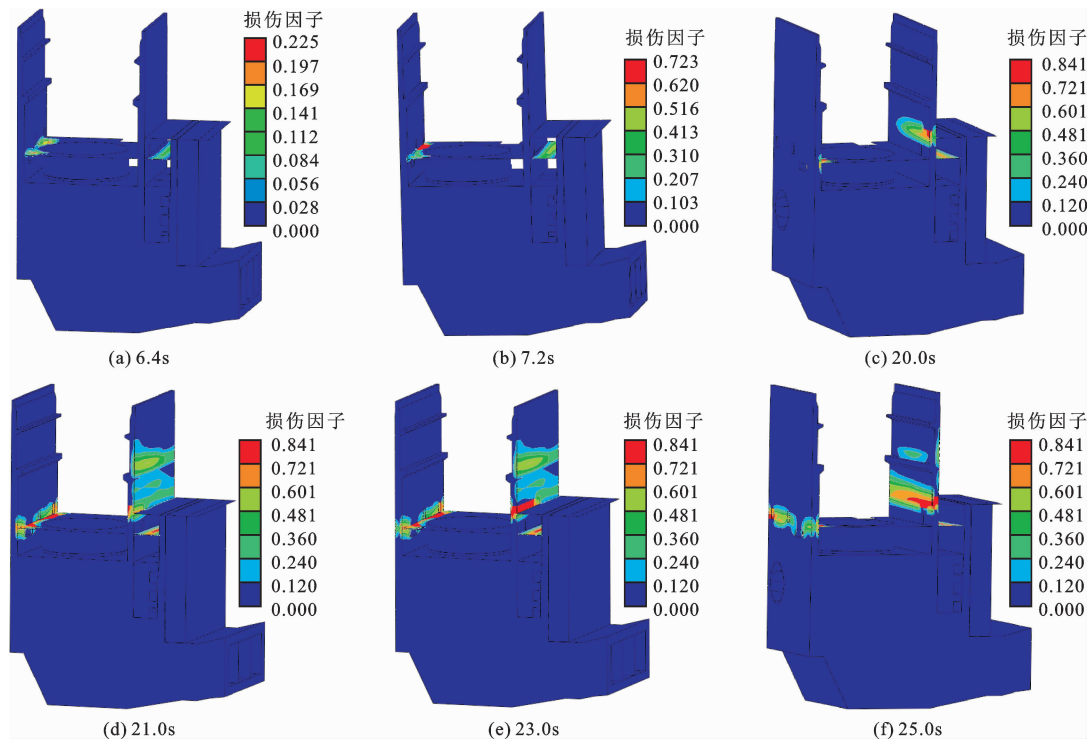


图 7 方案 1 厂房结构受拉损伤演化过程

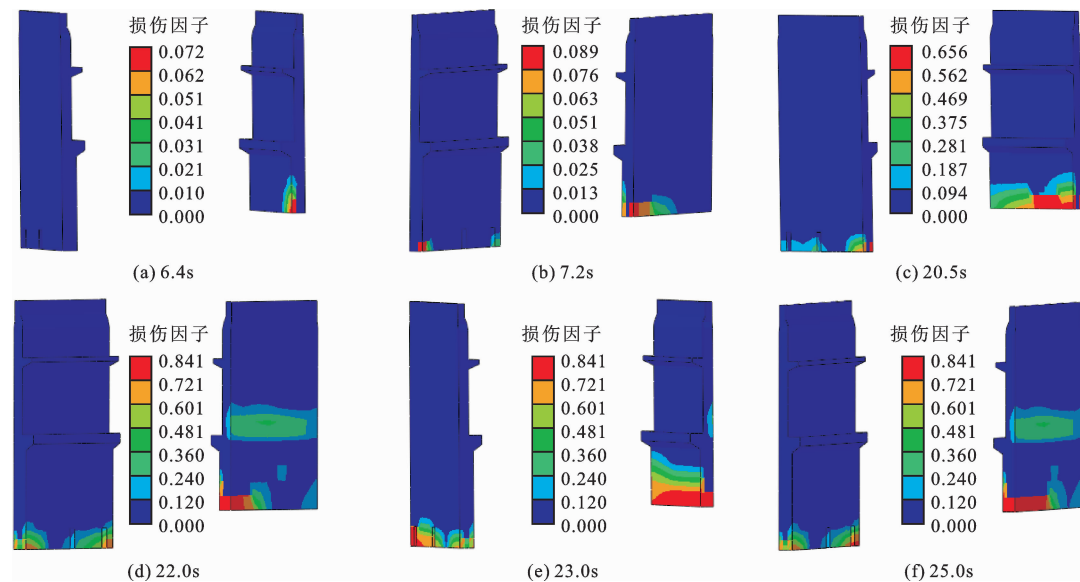


图 8 方案 2 厂房结构受拉损伤演化过程

从结构的受拉损伤演化对比可见,两种方案下结构损伤的演化过程、范围和程度均存在一定的差异,方案1厂房结构的损伤范围更大,上、下游墙均产生一定程度的破坏,其中下游墙体与副厂房接触部位的破坏更为严重,方案2结构发生损伤的范围总体较小,上游墙底部仅出现较小范围的破坏,而下游墙与副厂房接触部位则较方案1的破坏更为严重。结合两种方案上部结构的能量变化,可得出仅考虑厂房下部结构混凝土的线弹性本构关系将使上部结构的损伤范围减小,而使下游墙与副厂房接触部位的损伤程度加大,但是两种方案下结构的破坏模式相似,均为上部结构与下部结构的相交部位发生破坏,而且由于主厂房下游布置有较高的副厂房和尾水墩,均表现为下游侧墙体的损伤程度和范围大于上游墙,所以方案2所描述的上下部结构相互作用更为接近真实情况。

6 结 论

通过对4种计算方案下结构的峰值加速度、峰值位移和结构应力响应进行比较,以及分析下部结构混凝土材料考虑为线弹性本构模型时对厂房结构能量特性和破坏模式的影响,可得出以下结论:

(1)不考虑下部结构的放大效应将使结构的地震响应均小于真实值,且偏差最大;不考虑上下部结构耦联时,结构的应力响应相比真实值偏差较小,但上部结构的峰值加速度和峰值位移偏差较大;将下部结构混凝土材料考虑为线弹性则会使结构的地震响应略大于真实值,但是总体偏差很小。

(2)进一步探讨将下部结构混凝土材料考虑为线弹性本构关系对厂房在地震作用下能量特性和结构破坏模式的影响,结果表明将下部结构混凝土材料考虑为线弹性本构时,厂房结构的总输入能与真实情况相同,上部结构的塑性变形耗能和损伤耗能小于真实情况,损伤范围也较小,下游墙体的损伤程度却更为严重,但与真实情况的结构损伤模式相似,即上下部结构的相交部位在地震作用下最容易发生破坏,下游墙体的损伤范围和程度均大于上游墙体,所以能较准确地反映上下部结构间相互作用对结构地震响应的影响。

(3)在抗震分析时,应当对下部结构的放大效应和上下部结构之间的耦联作用予以考虑,否则将会使计算所得的结构响应偏小,对抗震设防不利。为了节约计算成本,可将下部结构混凝土按线弹性本构考虑做简化分析,此时计算所得的结构地震响

应略大,据此设防将会留有一定的安全裕度,有利于水电站厂房结构的抗震安全。

参考文献:

- [1] 裘民川. 水电站厂房的抗震设计问题[J]. 工程抗震, 1997(2): 1-5.
- [2] 苏晨辉, 宋志强, 耿 聘. 水电站地面厂房地震响应分析研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 137-145.
- [3] 张辉东, 王日宣, 王元丰. 大型水电站厂房结构地震时程响应非线性数值模拟[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 96-102.
- [4] 郝军刚, 胡 蕾, 伍鹤皋, 等. 罕遇地震作用下水电站厂房上部结构破坏模式研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 55-61.
- [5] 苏晨辉, 宋志强, 曹 伟, 等. 河床式水电站厂房地震响应软弱基岩弹模敏感性分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 69-74.
- [6] 张汉云, 张燎军, 李龙仲, 等. 水电站地面厂房鞭梢效应及抗震分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 88-92.
- [7] 张启灵, 伍鹤皋, 李端有. 水电站地面厂房抗震措施研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 184-190.
- [8] 刘昱杰. 水电站厂房在地震作用下能量反应分析及应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [9] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
- [10] 张 劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2018, 38(8): 127-130.
- [11] 杨 飞, 董新勇, 周沈华, 等. ABAQUS 混凝土塑性损伤因子计算方法及应用研究[J]. 工程结构, 2017, 37(6): 173-177.
- [12] 田连波, 侯建国. ABAQUS 中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 340-345+358.
- [13] 刘 巍, 徐 明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(S1): 167-171+213.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 刘晶波, 李 彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学(E 辑), 2005, 35(9): 966-980.
- [16] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [19] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB35047-2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [20] 张运良, 李建波. 水工建筑物抗震计算基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.