

文章编号: 2097-096X(2025)04-0383-10

强震区水电站地面厂房上部结构地震响应分析和抗震措施研究

刘彪¹, 李志远¹, 郭胜山¹, 赵建军², 赵宗国², 董丹丹²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 地面厂房上部采用排架柱结构具有节省材料、空间利用高等优点。但由于上下部结构存在显著的质量和刚度突变, 地震时将导致上部结构产生强烈的鞭梢效应。因此, 厂房排架柱的抗震安全评价及抗震措施研究是排架柱设计的关键问题。其中, 排架柱二阶效应的合理模拟是抗震安全评价里的重点和难点, 尤其对于国际水电工程设计, 如何基于国际规范正确地考虑二阶效应以及降低结构鞭梢效应是目前厂房抗震研究的热点之一。针对上述问题, 以印度尼西亚某水电站地面厂房为例开展了厂房上部结构地震响应分析, 对比分析了上部结构为排架柱和墙体两种不同设计方案在地震作用下的动力响应特性。研究表明: 从基础传来的地震波经厂房下部结构放大后, 对上部结构的地震反应影响显著。上部为墙体结构的动力响应小于排架柱结构, 增加剪力墙能有效提高厂房的抗震性能。

关键词: 水电站地面厂房; 排架柱结构; 鞭梢效应; 二阶效应; 抗震措施

中图分类号: TV741

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240234

1 研究背景

水电站地面厂房作为利用水力发电的主要建筑结构, 通常以发电机层楼板高程为界, 将主厂房分为上部结构和下部结构两部分。上部结构由墙、板、梁、柱等组成, 类似于单层厂房结构体系; 下部结构由容纳水轮发电机的大体积混凝土结构组成, 上部结构的刚度和质量明显低于下部结构。根据震害数据调查发现, 地震作用下水工建筑物中大体积混凝土结构受到的损坏极小, 而上部结构由于鞭梢效应显著更加容易产生严重的震损, 直接威胁到人员和供电安全, 还有可能造成严重的次生灾害^[1]。排架柱结构在水电站地面厂房中应用普遍, 但该类结构刚度较小, 是抗震的薄弱环节^[2], 二阶效应成为影响其抗震性能的重要因素, 尤其在中、大震下影响较为明显, 在工程设计中如何正确的考虑二阶效应以及降低结构鞭梢效应是目前研究的热点之一^[3-4]。

一些研究学者先后采用数值模拟方法对厂房抗震进行了研究分析, 进而对厂房结构地震响应的评估问题进行了探讨^[5-8]。张辉东等^[9]在考虑材料非线性问题基础上采用时程法对某水电站进行抗震分析研究, 发现可采用在上部结构底部施加固定边界的方法对坝后式厂房进行单独的抗震分析。Zhang等^[10]根据水电站厂房的几何构造、受力特点和动力特性建立了整体和局部模型, 并采用时程分析法对比分析了不同模型在地震中的动力响应, 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。霍学平等^[11]利用有限元法建立厂房结构的数值模型, 进行各种方案下厂房特性的对比分析, 研究发现上部结构增加剪力墙或实体墙后, 厂房的抗振性能可得到有效提高, 但其在进行厂房上部结构的动力特性分析时, 仅考虑厂房下部结构的弹性模量, 不计其质量, 以此来模拟下部结构对上部结构的弹性支撑和地基约束作用。

目前的研究普遍认为, 水电站地面厂房上部结构更容易受到地震破坏, 顺河向地震反应最为显

收稿日期: 2024-11-21; 网络首发时间: 2025-07-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20250711.1120.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209157)

作者简介: 刘彪(1992-), 博士, 工程师, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: lbiwhr@163.com

作者简介: 郭胜山(1985-), 博士, 正高级工程师, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: guoss@iwhr.com

著。因此，在一些水电站结构的抗震研究中，为了节省计算成本，会对下部结构进行简化^[12]。但这种方法往往难以准确反映电站上部结构与下部结构之间的相互作用，从而导致地震响应计算结果出现偏差，进而影响结构的抗震设计。此外，国内一些大型水电设计单位对美标、欧标等国际规范积累了经验，但基于美标的高震区排架柱结构分析和设计流程复杂，国内水电结构设计单位缺乏相关经验，这成为国际水电项目中采用美标进行高排架柱设计的制约因素。鉴于此，本文以印度尼西亚某水电站为例，建立了包括上部结构、下部结构和地基在内的完整三维有限元模型，对结构施加三向地震加速度分析了厂房上部结构的地震响应，并考虑了基于美标的排架柱二阶效应设计方法。针对厂房上部排架柱结构鞭梢效应显著的现象，对比分析了上部结构为墙和排架柱两种体型在地震作用下的动力响应特性。

2 鞭梢效应的理论分析

水电站地面厂房上部结构的质量和刚度远小于下部结构，在地震作用下会像鞭子一样出现明显的鞭梢效应^[13]。通过研究质量比和刚度比对结构鞭梢效应的影响可以避免不合理的建筑设计，使建筑结构在地震作用下不发生剧烈的鞭梢效应，避免建筑物严重破坏。

为简化分析，对实际厂房结构进行简化处理，将厂房下部结构和上部结构简化为一个具有两个自由度的体系^[14]。理论分析模型如图1所示，下部主体结构刚度为 k_1 、质量为 m_1 ，上部结构刚度为 k_2 、质量为 m_2 ，在无阻尼情况下，结构在地基运动下的运动微分方程为

$$[M] \left(\{\ddot{X}\} + \{\ddot{X}_g\} \right) + [K] \{X\} = \{0\} \quad (1)$$

式中： $[M] = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$ 为结构的质量矩阵； $[K] = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}$ 为结构的刚度矩阵； $\{X\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ 为结构的相对位移； $\{X_g\} = \begin{pmatrix} x_g \\ x_g \end{pmatrix}$ 为地面简谐运动引起的地基的位移； $\{\ddot{X}\} + \{\ddot{X}_g\}$ 为绝对加速度。

双自由度无阻尼体系受迫振动的动力方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = -m_1 \ddot{x}_g \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = -m_2 \ddot{x}_g \end{cases} \quad (2)$$

无量纲化处理方程减少方程参数，方程组两边同时除以 m_2 ：

$$\begin{cases} \frac{m_1}{m_2} \ddot{x}_1 + \frac{(k_1 + k_2)}{m_2} x_1 - \frac{k_2}{m_2} x_2 = -\frac{m_1}{m_2} \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 - \frac{k_2}{m_2} x_1 + \frac{k_2}{m_2} x_2 = -\ddot{x}_g \end{cases} \quad (3)$$

令

$$\delta_m = \frac{m_1}{m_2}, \delta_k = \frac{k_2}{k_1}, \varpi_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, \varpi_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, x_1 = A_1 \sin(\omega t), x_2 = A_2 \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中： δ_m 为上部结构和下部结构自由度的质量比； δ_k 为上部结构和下部结构自由度的刚度比； ϖ_1 、 ϖ_2 分别为下部结构和上部结构自由度的固有振动频率； ω 为角频率。

将式(4)代入到式(3)中可得

$$\begin{cases} -\frac{\omega^2 A_1 \sin(\omega t)}{\delta_m} + \left(1 + \frac{1}{\delta_k}\right) \varpi_2^2 A_1 \sin(\omega t) - \varpi_2^2 A_2 \sin(\omega t) = \frac{\omega^2 \sin(\omega t)}{\delta_m} \\ -\omega^2 A_2 \sin(\omega t) - \varpi_2^2 A_1 \sin(\omega t) + \varpi_2^2 A_2 \sin(\omega t) = \omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)即可得出

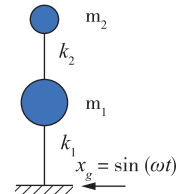


图1 结构计算简图

Fig. 1 The diagram of structural calculation

$$\begin{cases} A_1 = -\frac{\eta^2(-\delta_k \eta^2 + \delta_k + \delta_m \delta_k)}{\delta_m \eta^2 - \delta_m + \delta_k \eta^2 - \delta_k \eta^4 + \delta_m \delta_k \eta^2} \\ A_2 = -\frac{\eta^2(-\delta_k \eta^2 + \delta_k + \delta_m + \delta_m \delta_k)}{\delta_m \eta^2 - \delta_m + \delta_k \eta^2 - \delta_k \eta^4 + \delta_m \delta_k \eta^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\eta = \frac{\omega}{\omega_2}$ 。当外部激励频率接近上部结构的自然振动频率时， $\eta = \frac{\omega}{\omega_2} \approx 1$ 。此时，式(6)可以写成

$$\begin{cases} A_1 = -1 \\ A_2 = -\frac{\delta_m + \delta_m \delta_k}{\delta_m \delta_k} = -1 - \frac{1}{\delta_k} \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出，当上部结构的刚度远小于下部结构的刚度时，即 $\delta_k = \frac{k_2}{k_1} \approx 0$ ，上部结构的动力响应将达到无限大，而下部结构的振动却非常小，结构将具有很强的鞭梢效应。但是，当刚度比不是无限小时，增加上部结构的刚度可以大大减弱鞭梢效应。

3 二阶效应设计方法

结构或构件在发生侧向变形后，轴向压力在结构上引起附加内力而进一步增大结构的侧向变形，这种现象称为结构的二阶效应。对于结构设计中出现的一些长细比很大的柱体构件，二阶效应问题不容忽视，需要进行仔细的研究。针对处于高震区的大型水电站地面厂房，基于美标进行排架柱二阶效应的设计目前鲜有报道，本章系统总结了基于美标的排架柱二阶效应设计方法，以期为国际水电项目设计提供技术支撑。

3.1 判断二阶效应是否可以忽略 标准 ACI 318—19^[15]中规定对于有侧移框架结构如果满足式(8)则可以忽略二阶效应

$$\frac{kl_u}{r} \leq 22 \quad (8)$$

对于无侧移框架结构如果满足式(9)则可以忽略二阶效应

$$\frac{kl_u}{r} \leq 34 + 12(M_1/M_2) \quad (9)$$

式中： l_u 为无支撑长度； r 为回转半径， $r=0.3h$ ； M_1/M_2 是较小端弯矩与较大端弯矩之比； k 为有效长度系数，反映了柱端约束条件，取决于柱与梁在顶部和底部连接处的相对刚度 ψ_A 和 ψ_B ，相对刚度 ψ 的表达式为

$$\psi = \frac{[(EIl_c)_{\text{上柱}} + (EIl_c)_{\text{下柱}}]}{[(EIl)_{\text{左梁}} + (EIl)_{\text{右梁}}]} \quad (10)$$

式中： E 为混凝土的弹性模量； I 为界面惯性矩； l_c 为柱的长度； l 为梁的长度。

通过上述计算得到的柱与梁在顶部和底部连接处的相对刚度 ψ_A 和 ψ_B ，通过查图2^[15]的有效长度系数对数表即可以确定有效长度系数，图2(a)为无侧移框架结构对数表，图2(b)为有侧移框架结构对数表。

3.2 柱端弯矩放大系数计算 对于有侧移框架结构，柱端弯矩可以表示为

$$\begin{cases} M'_1 = M_{1ns} + \delta_s M_{1s} \\ M'_2 = M_{2ns} + \delta_s M_{2s} \end{cases} \quad (11)$$

式中： M'_1 和 M'_2 为考虑二阶效应放大后的柱端弯矩； M_{1ns} 和 M_{2ns} 为重力荷载引起的柱端弯矩； M_{1s} 和 M_{2s} 通常为由侧向荷载引起的侧移弯矩。弯矩放大系数 δ_s 的计算公式为

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{0.75 \sum P_c}} \quad (12)$$

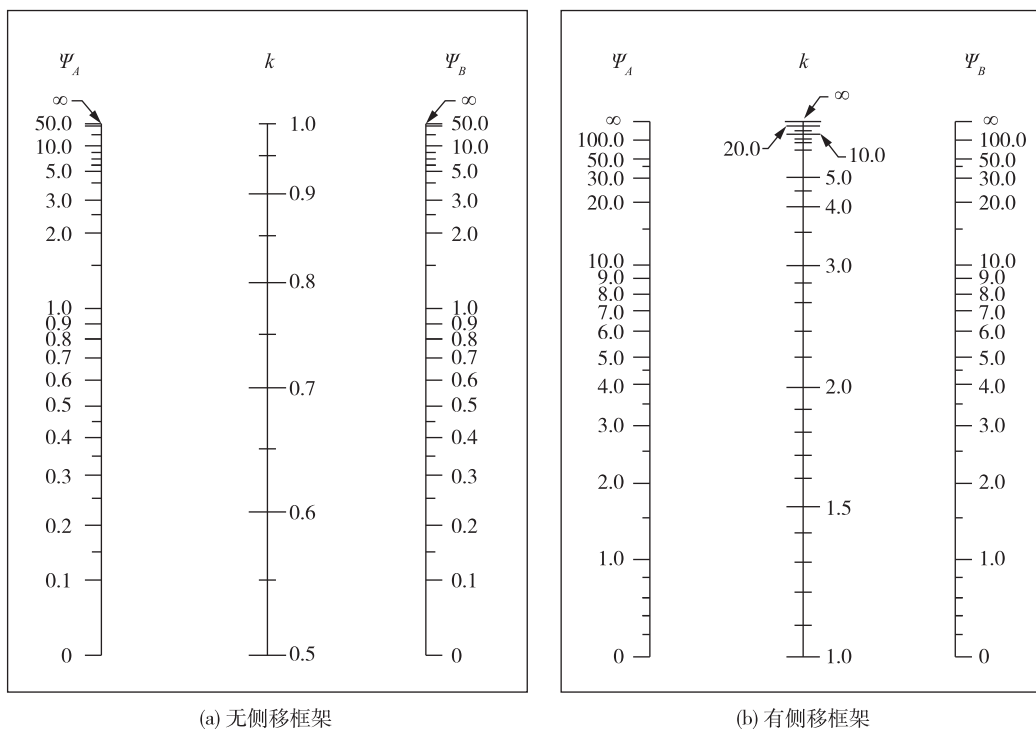


图2 有效长度系数对数表

Fig. 2 Logarithmic table of effective length coefficients

$$P_c = \frac{0.4\pi^2 E_c I_g}{(kl_u)^2} \quad (13)$$

式中： ΣP_u 为同一层中所有竖向荷载的总和； ΣP_c 为同一层中所有临界荷载之和； E_c 为混凝土的弹性模量； I_g 为截面惯性矩。式(13)综合考虑了混凝土开裂、徐变以及应力应变曲线的非线性造成的刚度变异性后混凝土柱所能提供的抵抗侧移的能力。

对于无侧移框架结构，柱端弯矩可以表示为

$$M_c = \delta_s M_2 \quad (14)$$

$$\delta_s = (0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2}) \frac{1}{1 - \frac{P_u}{0.75P_c}} \quad (15)$$

3.3 柱身弯矩放大系数计算 当满足式(16)时,不需要考虑沿着柱长方向弯矩的放大。

$$\frac{l_u}{r} \leq \frac{35}{\sqrt{\frac{P_u}{f'_c A_g}}} \quad (16)$$

式中： f'_c 为混凝土的抗压强度； A_g 为混凝土截面总面积。

当不满足式(16)时，采用式(14)(15)计算柱身弯矩，此时式(14)中的 M_2 为经过式(11)计算放大后的弯矩值。

当二阶弯矩(对于有侧移框架结构对应的二阶弯矩为 M'_1 和 M'_2 ，对于无侧移框架结构对应的二阶弯矩为 M_c)与一阶弯矩的比值小于1.4时，按照二阶弯矩进行配筋设计；当二阶弯矩与一阶弯矩的比值大于1.4时，需要重新设计柱子的尺寸。

4 地面厂房抗震稳定性分析

4.1 工程背景 印度尼西亚位于欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块的交界处，这一地理位置使得印

度尼西亚的地壳非常活跃,容易发生火山和地震等自然灾害。印尼某水电站位于印度尼西亚北苏门答腊省南部的巴丹托鲁河上,工程区距省会棉兰市约400 km,距离西苏门答腊省省会巴东市约410 km。该水电站具6 h日调节能力,电站额定水头275.86 m,设计流量207.55 m³/s,设4台机组,单机容量127.5 MW,总装机510 MW,多年平均发电量2228.14 GWh,年利用小时数4368.9 h。电站由主室、辅助室和支架间组成。上游辅房宽7.8 m,主房宽26.0 m,下游辅房宽9.5 m,尾水坝墩宽5.0 m,总宽48.3 m。建筑物自下而上分为尾水管层-涡轮层-水轮机层-母线层-发电机层。建筑总高度为49.3 m。

根据地震安全性评价报告的结论,该水电站厂房设计地震动峰值加速度为0.515 g,设计地震反应谱如图3所示。考虑了三个方向的地震^[16-17],当考虑竖向地震作用时,竖向地震作用可按照水平向地震作用的2/3进行取值。

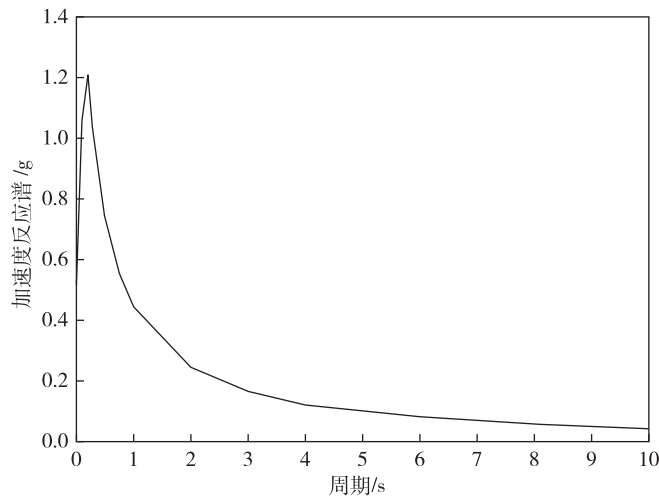


图3 设计反应谱

Fig. 3 Design reaction spectrum

4.2 数值模型和分析方法 厂房各机组段结构基本相同,为简化计算,选取中间机组段结构进行三维有限元计算,有限元模型如图4所示。本文比较分析了上部结构为排架柱或实体墙的两种地面厂房布置在地震作用下的动力响应。方案A为排架柱结构,如图4(c)所示(下部排架柱的横截面尺寸为2×1 m,上部排架柱的横截面尺寸为1×1 m);方案B为排架柱之间的剪力墙结构,如图4(d)所示,墙厚为2 m,上部排架柱的横截面尺寸与方案A相同。沿顺河向和横河向,地基深度取为水电站厂房高度的两倍。基岩底部完全约束,四周法向约束。静力和动力计算使用相同的模型和边界约束,X轴为顺河向,指向下游为正;Y轴为横河向,指向左岸为正;Z轴为垂直方向。电站厂房主体结构和基础采用实体单元模拟,钢蜗壳采用壳单元模拟,屋顶钢架采用杆件单元模拟,起重机、屋顶荷载和动水压力的重量以附加质量单元的形式施加在相应位置,结构采用线弹性模型。

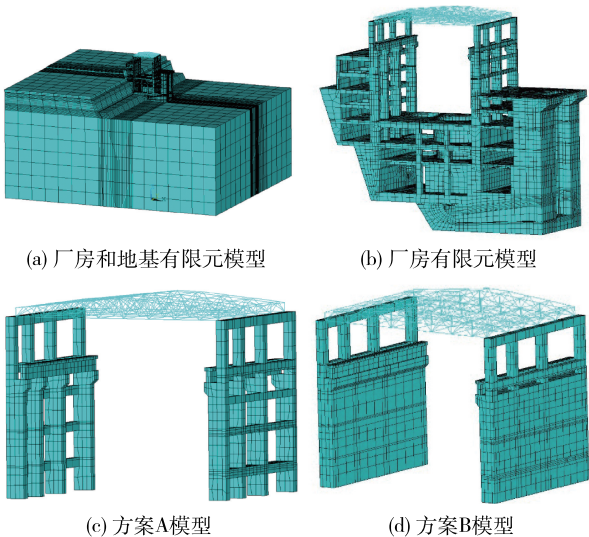


图4 三维整体有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional overall finite element model

本文以无质量地基模型计入地基刚度的影响,采用有限元方法进行振型分解反应谱法计算,以分析和评估上部结构的地震响应。采用无质量地基的反应谱模态叠加法通常进行线性分析,但还应考虑其他因素,包括模态数、模态响应组合以及多分量地震响应组合等。进行振型分解反应谱法计算时,

振型组合的阶数按照振型参与质量不小于结构总质量的90%选取；模态响应组合时采用CQC法对不同振型得到的响应量进行合并，以获得结构的总响应；多分量地震响应组合时采用平方和的平方根(SRSS)方法，将地震地面运动三个分量引起的最大响应进行合并。为了评估水工建筑物的抗震性能，应采用最不利原则将反应谱估算的动应力与静应力结合起来。

4.3 上部结构鞭梢效应及内力计算 方案A为上部排架柱结构，其在地震作用下的位移和应力分别如图5和图6所示。从图5中可以看出，地震时上部结构的动力位移比下部结构的动力位移明显增大，上部结构的动力位移沿标高方向逐渐增大，上部结构的振动相对于下部结构的振动剧烈，说明上部结构和下部结构的质量和刚度的突变会导致地震时排架柱结构鞭梢效应的出现。同样从图6中的应力云图可以看出，由于上部结构鞭梢效应的存在，上下柱截面变化及上下部结构连接的位置均出现较大的应力，是上部结构抗震薄弱部位。

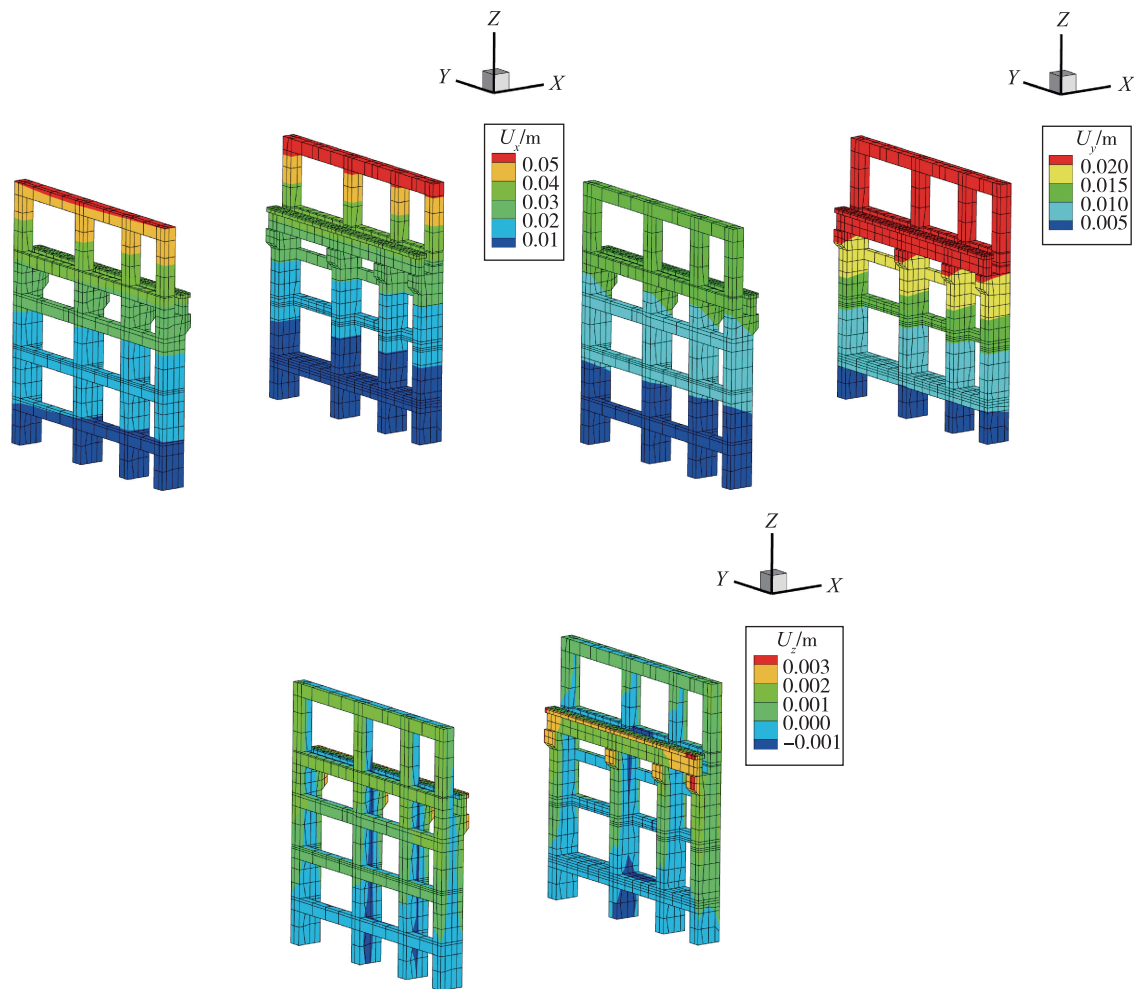


图5 方案A上部结构位移分布

Fig. 5 Distribution of superstructure displacements for scheme A

排架柱结构的配筋计算主要受Z方向应力的控制，为了进行配筋设计，选取Z方向应力最大的截面S1(见图6)进行内力计算，方案A中上部排架结构属于有侧移框架结构，通过本文二阶效应设计方法计算可知S1截面沿着顺河向的弯矩放大系数 δ_s 为1.04，沿着横河向弯矩放大系数 δ_s 为1.06，考虑二阶效应前后截面内力计算结果如表1所示，因此可见排架柱的二阶效应会增大截面的弯矩，进而增加配筋量，在排架柱结构配筋计算时不容忽视。

4.4 上部结构优化设计 为了降低上部排架结构的鞭梢效应，在排架柱间增加剪力墙结构，如图4(d)所示。图7显示了上部结构为排架柱以及剪力墙结构设计时相对应的频率变化。根据计算结果可以看出，排架柱结构的频率值小于墙结构的频率值，表明结构刚度相对较低。从模态振型可以看出，在

表1 考虑二阶效应前后截面内力对比

Table 1 Comparison of internal forces in the section before and after considering the second order effect

截面	不考虑二阶效应弯矩 M_x	不考虑二阶效应弯矩 M_y	考虑二阶效应弯矩 M'_x	考虑二阶效应弯矩 M'_y	轴力 $F_n/(KN)$
	$/(KN \cdot m)$	$/(KN \cdot m)$	$/(KN \cdot m)$	$/(KN \cdot m)$	
S1	776.06	2008.00	784.09	2141.88	412.42
	776.06	2008.00	784.09	2141.88	862.44
	828.62	2394.00	836.65	2519.80	412.42
	828.62	2394.00	836.65	2519.80	862.44

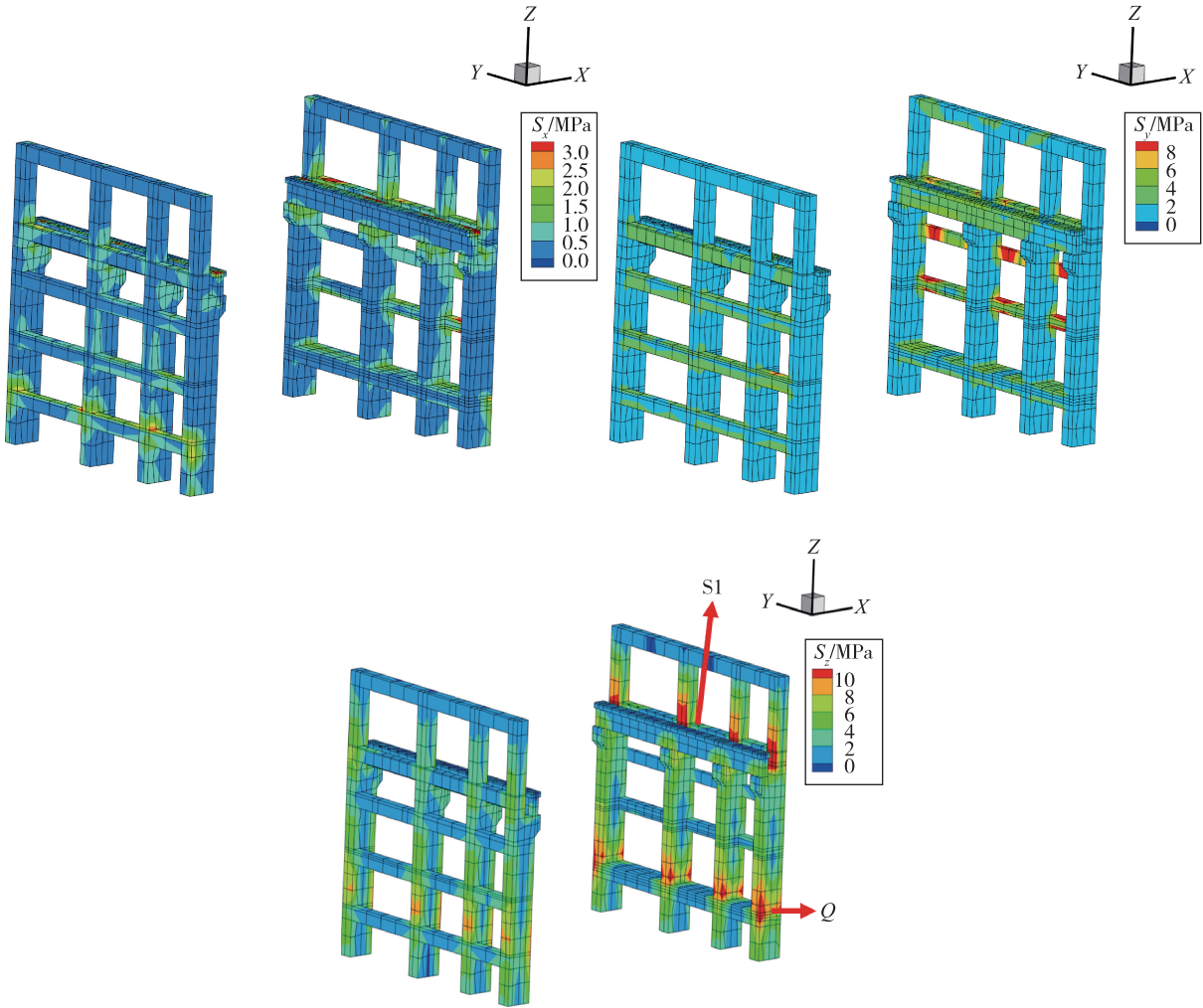


图6 方案A上部结构应力分布

Fig. 6 Distribution of stresses in the superstructure of scheme A

排架柱之间增加剪力墙可以增强结构的整体刚度，剪力墙把离散的排架柱连成整体，形成类似竖向深梁的效应，使结构振型从“柔性摆动”转变为“整体平动+弯曲”，抑制鞭梢效应在各个方向的放大，从而降低鞭梢效应的影响。图8为在排架柱之间增加剪力墙时上部结构的应力分布，从图中可以看出应力明显减小。表2对比了排架柱结构增加剪力墙前后柱端Q点应力的变化，增加剪力墙后柱端的应力大幅降低。由此可见，在排架柱间填充剪力墙可有效降低鞭梢效应。

5 结论

水电站地面厂房作为水电站枢纽布置的核心区域，排架柱结构在水电站地面厂房中应用普遍，但该类结构刚度较小，是抗震的薄弱环节，二阶效应成为影响其抗震性能的重要因素，尤其在中、大震下影响

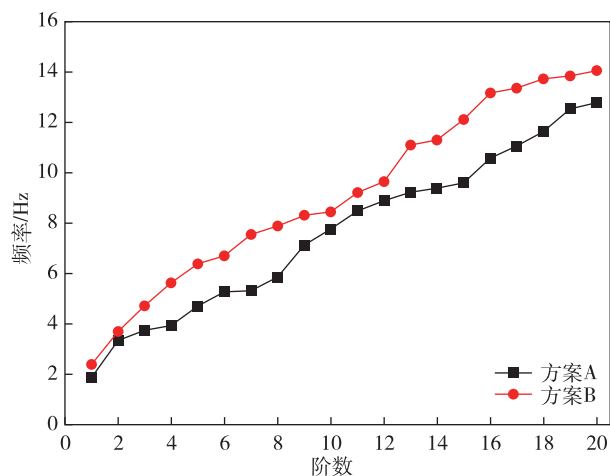


图7 不同方案自振频率对比

Fig. 7 Comparison of natural frequencies for different schemes

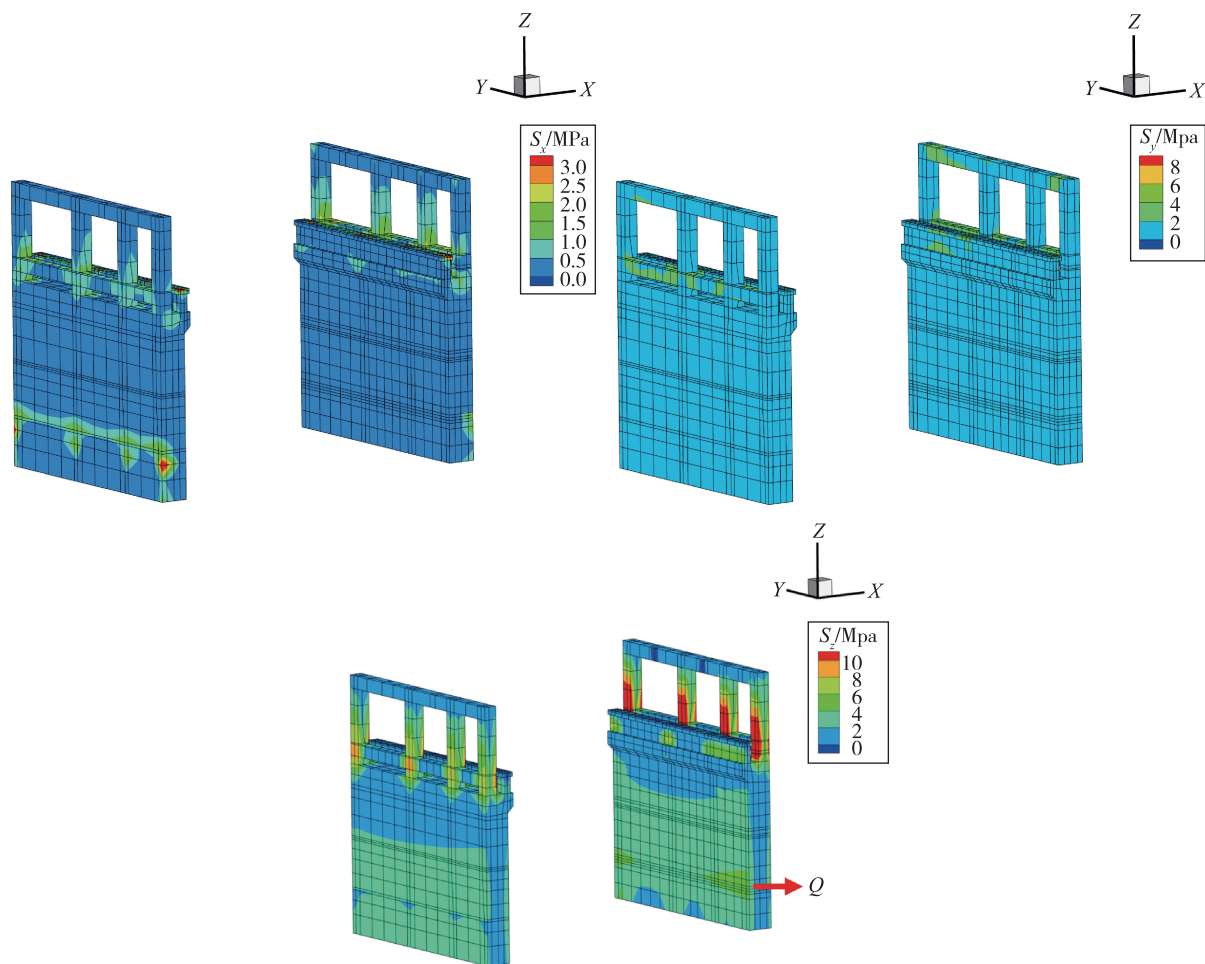


图8 方案B应力分布

Fig. 8 Distribution of stresses in the superstructure of scheme B

表2 增加剪力墙前后柱端应力对比

Table 2 Comparison of column end stress before and after adding shear wall

柱端应力	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_z/MPa
Q(方案A)	0.150	0.292	12.483
Q(方案B)	0.055	0.021	4.280

较为明显,在国际水电工程设计中如何基于美标正确的考虑二阶效应以及降低结构鞭梢效应是当前厂房抗震设计关注的焦点。本文以印度尼西亚某水电站地面厂房为例,开展了厂房上部结构地震响应分析,对比分析了上部结构为排架柱和墙体两种不同设计方案在地震作用下的动力响应特性。结论如下:

(1)系统总结了国际水电项目中地面厂房排架柱结构二阶效应的设计方法,通过工程实例对比了排架柱结构考虑二阶效应前后截面内力的变化,结果表明排架柱的二阶效应会增大截面的内力,沿着顺河向的弯矩放大系数 δ_1 为1.04,沿着横河向弯矩放大系数 δ_2 为1.06,在排架柱结构配筋计算时不容忽视。

(2)对比分析了上部结构为排架柱以及墙体结构在地震作用下的动力响应,研究发现排架柱结构的自振频率值小于墙体结构的频率值,即在排架柱之间增加剪力墙能有效提高结构的刚度,从而降低鞭梢效应的影响。

(3)水电站地面厂房上部结构的抗震设计必须考虑下部结构对地震加速度的放大。上下柱截面变化及上下部结构连接的位置均会出现较大的应力,是上部结构抗震薄弱部位。

参 考 文 献:

- [1] 陈厚群,张翠然.设定地震场地相关设计反应谱的研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(4):307-314.(CHEN Houqun, ZHANG Cuiran. A study on setting up seismic site-related design response spectra[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(4): 307-314. (in Chinese))
- [2] 张剑峰,宋志强,王飞,等.上-下部结构相互作用对水电站厂房地震响应的影响研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):186-193.(ZHANG Jianfeng, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Study on the effect of upper-substructure interaction on seismic response of hydropower plant[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 186-193. (in Chinese))
- [3] KAZEMI F, ASGARKHANI N, JANKOWSKI R. Machine learning-based seismic response and performance assessment of reinforced concrete buildings[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2): 94.
- [4] WANG X, CHEN J, XIAO M. Seismic responses of an underground powerhouse structure subjected to oblique incidence SV and P waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 130-143.
- [5] 陶永霞,职保平,蒋莉,等.不同边界条件下抽水蓄能电站地下厂房地震动响应分析[J].水电能源科学,2018,36(7):79-82.(TAO Yongxia, ZHI Baoping, JIANG Li, et al. Analysis of ground vibration response of underground plant of pumped storage power station under different boundary conditions[J]. Hydropower Energy Science, 2018, 36(7): 79-82. (in Chinese))
- [6] SONG Z, WANG F, LI Y, et al. Nonlinear seismic responses of the powerhouse of a hydropower station under near-fault plane P-wave oblique incidence[J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109613.
- [7] 孙莹,陈利利,蒋莉,等.基于不同边界的水电站厂房振动特性研究[J].人民黄河,2018,40(4):108-111,116.(SUN Ying, CHEN Lili, JIANG Li, et al. Research on vibration characteristics of hydropower plant based on different boundaries[J]. People's Yellow River, 2018, 40(4): 108-111, 116. (in Chinese))
- [8] 肖微,刘国庆,王伟,等.大型抽水蓄能电站地下厂房结构自振特性分析[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2024,22(2):138-148.(XIAO Wei, LIU Guoqing, WANG Wei, et al. Analysis of self-oscillation characteristics of underground plant structure of large pumped storage power station[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 138-148. (in Chinese))
- [9] 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(4):96-102.(ZHANG Huidong, WANG Rixuan, WANG Yuanfeng. Nonlinear numerical simulation of seismic time response of large hydropower plant structure[J]. Journal of Hydropower Generation, 2007(4): 96-102. (in Chinese))
- [10] ZHANG L J, ZHANG H Y, JI Y X, et al. Whiplash effect on hydropower house during an earthquake[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2014, 14 (4): 232-261.
- [11] 霍学平,马震岳,陈婧,等.水电站地面厂房上部结构抗振分析[J].人民黄河,2016,38(8):95-98.(HUO Xueping, MA Zhenyue, CHEN Jing, et al. Analysis of vibration resistance of the superstructure of ground plant of hydropower station [J]. People's Yellow River, 2016, 38(8): 95-98. (in Chinese))
- [12] 童广勤,梁辉,耿峻,等.三峡大坝巴东地震动力响应分析与强震监测比对研究[J].中国水利水电科学研究

- 院学报(中英文), 2024, 22(1): 73–83. (TONG Guangqin, LIANG Hui, GENG Jun, et al. Dynamic response analysis of the Three Gorges Dam Badong earthquake and comparison study of strong earthquake monitoring[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 73–83. (in Chinese))
- [13] 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. (ZHANG Hanyun, ZHANG Liaojun, LI Longzhong, et al. Whiplash effect and seismic analysis of hydropower plant[J]. Hydropower Energy Science, 2012, 30(1): 88–92. (in Chinese))
- [14] 马国洋, 郭振凯. 某水电站进水塔地震作用下鞭梢效应分析[J]. 广东水利水电, 2021(1): 13–17. (MA Guoyang, GUO Zhenkai. Analysis of whiplash effect of a hydropower station intake tower under earthquake [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021 (1): 13–17. (in Chinese))
- [15] Building Code Requirements for Structure concrete: ACI 318—19 [S]. American Concrete Institute, 2019.
- [16] 秦礼君, 陈健云, 徐强, 等. 高拱坝抗震安全评价指标研究—以白鹤滩拱坝为例[J]. 水利学报, 2022, 53(9): 1116–1126. (QIN Lijun, CHEN Jianyun, XU Qiang, et al. Study on seismic safety evaluation index of the high arch dam: A case study of Baihetan Arch Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(9): 1116–1126. (in Chinese))
- [17] 黄会宝, 陈刚, 江德军. 四川泸定 Ms6.8 级地震大岗山特高拱坝变形特征分析[J]. 水利学报, 2023, 54(5): 599–609. (HUANG Huibao, CHEN Gang, JIANG Dejun. Deformation characteristics analysis of Dagangshan super high arch dam in Sichuan Luding Ms6.8 earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(5): 599–609. (in Chinese))

Research on seismic response analysis and seismic measures of superstructure of ground powerhouse in strong earthquake areas

LIU Biao¹, LI Zhiyuan¹, GUO Shengshan¹, ZHAO Jianjun², ZHAO Zongguo², DONG Dandan²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: The superstructure of the hydropower station ground powerhouse adopts the frame-column structures with the advantages of material saving and high space utilization. However, due to the significant mass and stiffness mutation of the superstructure and substructures, strong whiplash effect will occur in the upper structures during earthquakes. Therefore, the seismic safety evaluation and seismic measures are usually the key issues in the design of the frame-column structure. Among them, the reasonable simulation of the second-order effect of the frame-column is the key and difficult point in the seismic safety evaluation, especially for the design of international hydropower projects. How to correctly consider the second-order effect based on the international code and how to reduce the structural whiplash effect are one of the hotspots in the seismic research of the ground powerhouse at present. In order to address the above problems, the seismic response analysis of the superstructure of a hydropower station ground powerhouse in Indonesia was carried out as an example, and the dynamic response characteristics of the superstructure with two different design schemes, namely, the frame-column structures and the walls, were analyzed comparatively under seismic effects. The study shows that the seismic response of the superstructure is significantly affected by the amplification of the seismic wave from the foundation by the substructure of the powerhouse. The dynamic response of the wall structure is smaller than that of the frame-column structure, and the addition of shear wall can effectively improve the seismic performance of the powerhouse.

Keywords: ground powerhouse of hydropower station; frame-column structure; whiplash effect; the second-order effect; aseismic analysis

(责任编辑: 李 娜)