

水库地震作用下超高压输电塔力学响应及 加固措施研究^{*}

邹英杰¹ 段国勇^{1,2,3} 芮 焘¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002;
3. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 宜昌 443002)

摘 要: 为了研究水库地震对超高压输电塔的影响,基于白鹤滩库区蓄水以来的地震统计规律所得出的水库地震目标反应谱,从太平洋地震网选择符合规律的水库地震记录,采用有限元方法研究输电塔在水库地震下的力学响应。在此基础上,针对薄弱位置采用碳纤维增强复合材料加固,并分析其加固效果。计算结果表明,水库地震作用下输电塔薄弱位置出现在塔身中部及塔腿处;在最大震级为6级的水库地震荷载下,输电塔整体保持稳定并未出现杆件失效等情况;对输电塔施加不同方向荷载,发现水平方向荷载对输电塔影响更为显著。针对输电塔薄弱位置使用双层碳纤维增强复合材料粘贴加固,在相同工况下,塔顶、塔身、塔腿最大位移分别降低12.26%、9.34%、9.57%。模拟结果验证了加固措施的有效性,为后续抗震加固研究提供一定理论支撑。

关键词: 输电塔; 水库地震; 损伤分析; 有限元仿真

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Study on mechanical response and reinforcement measures of ultra-high voltage transmission towers under reservoir seismic effects

Zou Yingjie¹ Duan Guoyong^{1,2,3} Rui Tao¹

(1. School of Electricity and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Power Transmission Line Engineering Technology Research Center, Three Gorges University,
Yichang 443002, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area,
Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to study the impact of reservoir earthquakes on ultra-high voltage transmission towers, this paper is based on the target response spectrum of reservoir earthquakes derived from the seismic statistical law since the water storage in Baihetan reservoir area, selects the reservoir earthquake records that conform to the law from the pacific ocean seismic network, and adopts the finite element method to study the mechanical response of the transmission towers under the reservoir earthquakes. On this basis, carbon fiber reinforced composite materials are used to reinforce the tower for the weak position, and the reinforcement effect is analyzed. Calculation results show that under the reservoir earthquake, the weak positions of the tower appear in the middle of the tower body and the tower legs; under the maximum seismic load of reservoir earthquake of magnitude 6, the tower remains stable and there is no failure of the rods, etc., applying different directional loads to the tower, it is found that the horizontal load has a more significant effect on the tower. For the weak position of the tower, double-layer carbon fiber reinforced composite material is used for reinforcement, and under the same working condition, the maximum displacement of the tower top, tower body and tower legs are reduced by 12.26%, 9.34% and 9.57%, respectively. The simulation results verify the effectiveness of the reinforcement measures and provide certain theoretical support for the subsequent seismic reinforcement research.

Keywords: transmission tower; reservoir earthquake; damage analysis; numerical simulation

收稿日期: 2024-10-09

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51439003)资助

0 引言

水力发电作为清洁能源在实现碳达峰、碳中和的目标中具有重要意义,我国西南地区如四川、云南等地具有丰富的水力资源。2023年白鹤滩水电站共发出电能 $573.24 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,这些电能发出后先经由库区超高压线路输送至换流站,转换为直流后从换流站输送至全国各地。然而水库在运行过程中,水库地震频发。水库地震震级大多不超过6级,震中位置在水库库区周边 $2 \sim 40 \text{ km}$ 之内^[1]。从白鹤滩水电站到白鹤滩换流站直线距离约 60 km ,超高压线路大部分输电塔位于水库地震影响范围之内。

水库地震的发生与水库水位变化密切相关,代一鸣等^[2]通过分析三峡水库蓄水位变化与库区地震活动得出水库地震与库区水位变化的关系,蓄水初期或水位变化较快时水库地震发生频率明显高于其他时期。赵策^[3]采用金沙江下游水库台网2016~2018年记录的水库地震数据,总结金沙江下游产生水库地震的规律并对可能发生的地区进行预测。赵仰康^[4]在SAP2000有限元软件中建立猫头型输电塔模型,分析模型在近场脉冲型地震下的位移,采用裕度比定量评估猫头塔的抗倒塌能力。王飞^[5]以特高压自力式悬垂塔为原型建立比例模型,采用地震振动台对模型进行振动试验,得出不同地震大小对该型号输电塔的影响,通过改变地震输入方向得出顺线向地震对输电塔线影响最大。陈龙强等^[6]利用ANSYS平台,分析大跨越输电塔线动力特性,发现输电塔自振频率在存在导、地线荷载时下降,自振周期增大。文献[7-8]对500 kV双回路典型铁塔在强震作用下的承载能力进行研究,对于横担悬臂较长的输电塔,应该考虑竖向地震动。针对输电塔损伤,文献[9-10]通过数值仿真计算得出输电塔主材杆件失效概率高于斜材与辅材。代紫兰^[11]对两端偏压的输电塔角钢杆件进行有限元分析,提出了一种新型的夹具式角钢加固方案。通过有限元软件考虑不同长细比、宽厚比、紧固件间距、螺栓预紧力、夹具厚度、钢材强度对加固效果的影响,结果表明螺栓预紧力增大会提高加固试件的传力效率,紧固间距对加固效果影响不大。然而,当前大多数学者仅单独对水库地震或输电塔响应进行分析计算,缺少水库地震作用下输电塔结构位移和变形的研究。至今为止国内外的专家学者在输电塔抗震研究领域已经取得了一系列的成果,但主要研究对象一般为非水库地震,对水库地震研究目前尚处于资料积累和初步分析评价研究阶段。因此,探究水库地震影响下库区输电塔线的力学响应有助于提高库区输电线路应对突发情况的能力,为库区输电塔线的设计提供技术支持。

本文基于白鹤滩库区真实的地震波数据选取设计反应谱,采用有限元方法,针对库区500 kV输电塔分别从水平和竖直方向输入地震波,分析铁塔在不同工况下的力学响应,对其薄弱部位采用碳纤维增强复合材料加固并分析其加固效果,计算结果可为库区输电铁塔的安全性分析提

供参考。

1 地震波选取

水库地震主要由水库水位变化引起,因此水库地震发生时震源相对较浅,震感较为强烈,容易在局部地区产生破坏^[12]。相比于天然地震而言,水库地震大多为小型地震,具有地震动持续时间短,峰值加速度高,衰减快等特点。在进行地震响应分析时,直接使用一般天然地震不能很好的反应出输电塔在水库地震作用下的特征。由于水库地震的这些特点,使得其相应地震反应谱与一般天然地震反应谱存在较大差别。相较于直接使用天然地震波,通过设计反应谱选择与之接近的地震波或人工地震波可以更好的模拟水库地震,计算结果更符合实际情况。

在设计反应谱时主要考虑场地类型、震级和震源深度。我国《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002—2021)将工程场地按剪切波速分为I~IV 4类,依据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)确定库区输电塔所处场地类型为II类场地。1962年广东新丰江6.1级水库地震是我国探测到的最大震级水库地震,也是世界上4次6级以上水库地震之一,在设计反应谱时震级不应超过6级。以白鹤滩水库为例,白鹤滩水库某监测站自白鹤滩水库蓄水后至2023年8月所监测水库地震共发生17 798次,其中 $0 \sim 10 \text{ km}$ 共15 610次, $10 \sim 20 \text{ km}$ 有2 410次, 20 km 以上仅有48次,由此可确定水库地震震源深度不超过 20 km 。

按水库地震特性初步选取震源深度在 $0 \sim 20 \text{ km}$ 、发震时场地类型为II类、震级在 $5 \sim 6$ 级、峰值加速度 $0.05g$ 下的水平地震影响系数曲线作为计算反应谱。计算设计反应谱如图1所示。

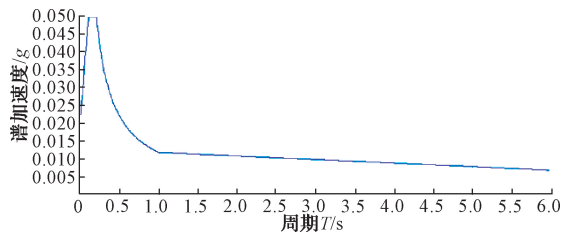


图1 设计反应谱

Fig. 1 Design reaction spectrum

基于设计反应谱从太平洋地震工程研究中心(PEER)NGA-West2数据库下载地震动记录,按台站与地震发生位置距离由小到大排序选取5条地震记录,分别记为D1~D5,地震记录具体信息如表1所示。

2 仿真模型建立

本文选取500 kV山区输电塔作为研究对象,铁塔为SJC2双回路耐张塔,总高度为 61.3 m ,呼称高为 30 m ,横担长度分别为 26 、 16 、 23.2 、 21 m 。主材采用Q420角钢,斜材采用Q345角钢,辅材采用Q235角钢。输电塔的详细尺寸信息、杆件位置分布和节间划分如图2所示。

表 1 选取地震记录

Table 1 Selected earthquake records

编号	地震记录名称	起始时间/s	5%~95% 持续时间/s	震级	震源深度/km
D1	Helena_ Montana-01	0.1	2.5	6.00	2.07
D2	San Francisco	0	5.0	5.28	9.74
D3	Lytle Creek -01	0	3.2	5.33	17.33
D4	Lytle Creek-02	0.1	2.2	5.33	18.39
D5	Northern Calif-07	0.1	5.7	5.20	18.73

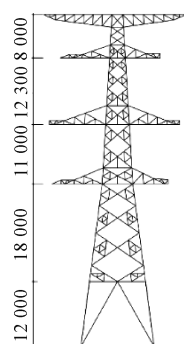


图 2 尺寸信息

Fig. 2 Dimensional information

采用 Rhino 软件绘制输电塔模型,利用 ABAQUS 软件分析模型在水库地震荷载下的响应。如图 3 所示,建模时铁塔杆件采用 BEAM188 梁单元模拟,对于长度在截面尺寸 10 倍以上的结构,仿真分析时使用梁单元模拟可以得出较好的结果,同时采用梁单元能大幅缩减模型规模,提高计算效率。内部节点均使用刚性连接模拟螺栓连接,输电塔底部使用固定连接模拟塔腿插入混凝土基础。

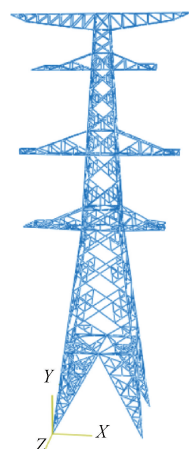


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

3 计算结果分析

3.1 确定输电塔薄弱位置

将 D1 记录的地震波作为激励导入输电塔模型,D1 地

震波加速度曲线如图 4 所示。绘制输电塔单侧主材最大位移曲线如图 5 所示。

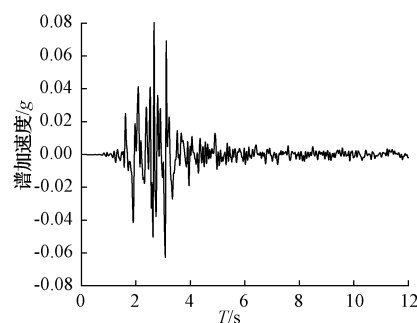


图 4 D1 地震波加速度曲线

Fig. 4 D1 seismic wave acceleration curve

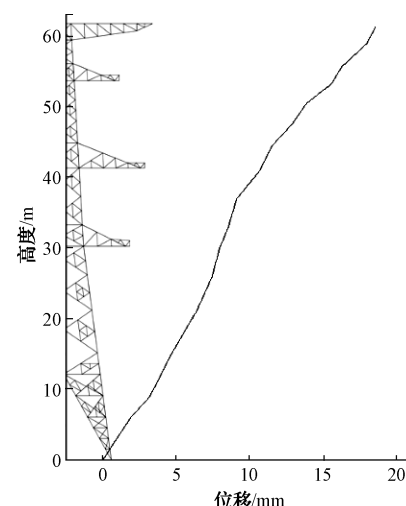


图 5 D1 荷载下主材位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of main material under D1 load

从图 5 可以看出,在 D1 荷载下塔顶主材位移最大为 18.524 mm,输电塔各主材位移增量不一致,塔头处位移增量明显大于塔身与塔腿。增量发生较大变化位置分别在塔高 9 和 37 m 处,分别对应塔腿第 2 节主材和塔身横担上方第 1 节主材。为进一步确定输电塔薄弱位置应同时考虑在该时刻下应力分。

选择输电塔整体出现最大应力时刻下的应力图,比较输电塔各杆件的应力分布,确定输电塔应力集中位置。根

根据地震波加速度曲线,选择 $t=2.7$ s(输电塔位移达到峰值)时刻输电塔应力分布云图进行分析,如图6所示,输电塔应力最大处均在图中标出。

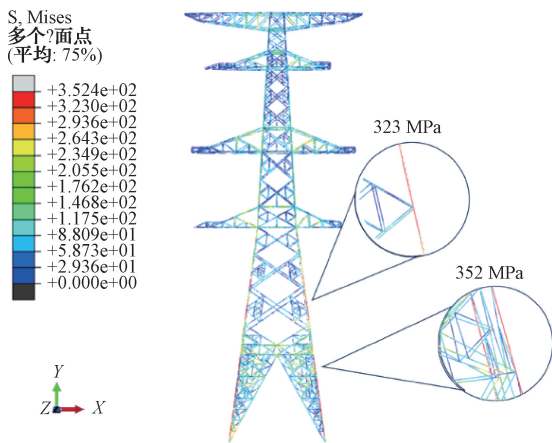


图6 输电塔应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram for transmission tower

从应力云图可以看出,在地震荷载下,主要应力分布在输电塔塔身下半部分。在输电塔横担处,应力主要集中在横担与塔身链接前两节出且应力较小。在塔身处,主材所受应力较大,塔身应力最大值出现在第2节主材中部与

辅材连接处,最大应力为 323 MPa。在塔腿处,塔腿主材应力显著高于其他部位且分布较为均匀,应力最大处位于塔腿塔身连接处约为 352 MPa。在 6 级水库地震荷载下,输电塔杆件并未出现明显失效状况,杆件所受应力与屈服应力之比最大为 0.838,大于 0.8,可以确定塔腿杆件为薄弱位置。塔身第 2 节主材中部应力与屈服应力之比为 0.769,小于 0.8,由于库区输电塔工作在水库地震频发环境中,塔身杆件长时间工作在不均匀荷载条件下存在较大危险,故将塔身第 2 节主材中部也视为薄弱位置。

综合位移曲线与应力云图,在水库地震频发环境中,输电塔两处薄弱位置分别位于塔身第 2 节主材中部和塔腿主材连接处。在分析输电塔水库地震响应时除计算塔身薄弱位置、塔腿薄弱位置、输电塔顶点外,还应考虑地线横担偏移对输电塔造成的影响。

3.2 竖直地震荷载下输电塔响应

采用 ABAQUS 进行数值模拟时,保持输电塔整体结构和自身荷载不变,选择 D1~D5 各条地震记录竖直方向分量作为竖直地震荷载输入输电塔,模拟不同地震条件下输电塔响应。地震竖直方向分量沿 y 轴正方向施加于输电塔塔脚,输电塔重力荷载沿 y 轴负方向在输电塔上均匀分布。得出在不同地震荷载下输电塔顶点,薄弱位置,地线横担的位移,如表 2 所示。

表 2 地震竖直荷载下最大位移

Table 2 Maximum displacement under seismic vertical load

(mm)

地震荷载	塔腿薄弱位置	塔身薄弱位置	地线横担左	地线横担右	顶点
D1	7.014	7.632	8.824	8.547	8.541
D2	5.472	6.049	6.758	6.574	6.340
D3	5.734	6.332	6.735	6.581	6.653
D4	5.613	6.189	6.653	6.507	6.417
D5	5.490	6.080	6.502	6.380	6.246

其中,D1 荷载震级为 6 级,D2 荷载震级为 5.28 级,D3、D4 荷载震级均为 5.33 级,D5 荷载震级为 5.2 级;在 D1~D5 荷载下,地线横担左侧位移量均大于右侧,D1~D5 荷载下左右侧位移量差值分别为 0.277、0.184、0.154、0.146、0.122 mm;左右侧位移量差值分别占输电塔顶点位移量的 3.24%、2.9%、2.32%、2.28%、1.95%。可以看出左右侧位移量差值随水库地震等级升高而增大,但这种变化在水库地震影响下效果并不显著。在 D1~D5 荷载下,塔身薄弱位置位移量均大于塔腿,在 D1~D5 荷载下差值分别为 0.618、0.577、0.598、0.576、0.590 mm;塔腿与塔身薄弱位置之比分别为 0.919、0.905、0.906、0.907、0.903。说明塔身位移相较于塔腿更明显,二者之比随地震等级升高呈逐渐增大但未超过 1,在 6 级水库地震时最大为 0.919,因此在分析时可使用塔身薄弱位置近似代替塔腿薄弱位置。

在 5 种水库地震竖直荷载下,塔身薄弱位置最大位移

量均大于其他位置,但 D1 荷载下各节点最大位移量明显高于其他荷载,6 级地震下塔身薄弱位置最大位移量相比于 5.33 级、5.28 级和 5.2 级分别提升 17.03% (D4 为 18.91%)、20.74% 和 20.34%,说明随着地震等级的上升,输电塔的稳定性能会逐渐降低。

选择输电塔顶点和塔身薄弱位置进行分析,D1~D5 地震竖直荷载下输电塔塔顶和塔身薄弱位置的位移随时间变化曲线,如图 7~11 所示。

在 6 级水库地震荷载时,塔身薄弱位置出现最大位移为 7.632 mm,顶点的最大位移为 8.541 mm,当所施加地震荷载时间超过 5 s 时,塔身薄弱位置位移曲线在 +0.36 mm 附近波动,说明塔身薄弱位置出现向上偏移,偏移量约为 0.36 mm。从位移曲线上看 D1 和 D3 荷载下偏移现象较为明显。

3.3 水平地震荷载下输电塔响应

使用所选取的 5 条地震事件水平方向分量作为荷载,

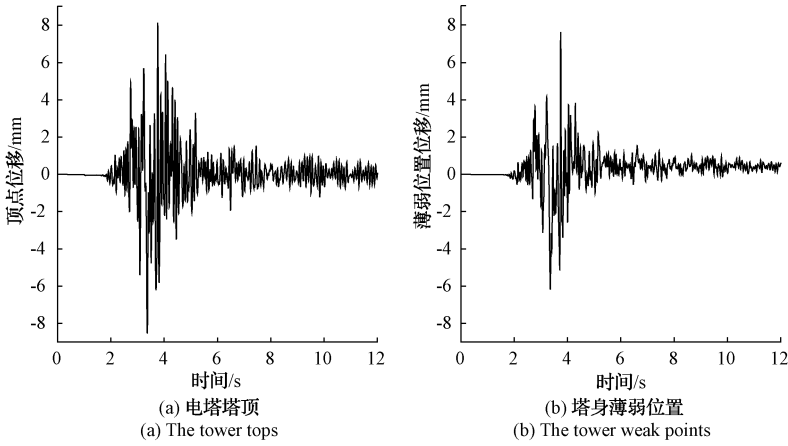


图 7 D1 地震垂直荷载
Fig. 7 D1 seismic vertical loading

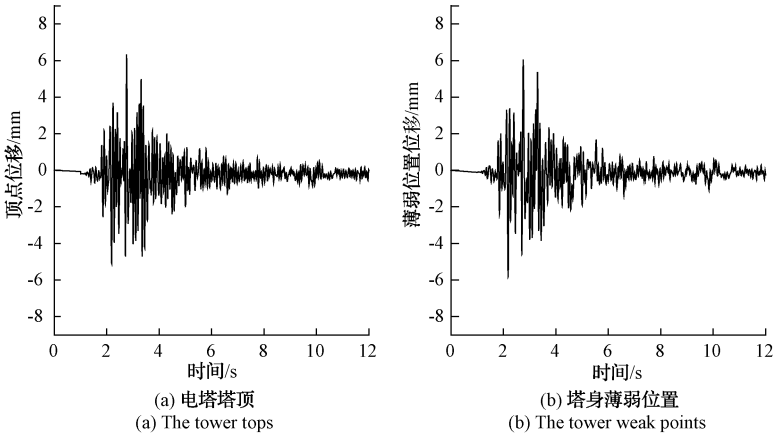


图 8 D2 地震垂直荷载
Fig. 8 D2 seismic vertical loading

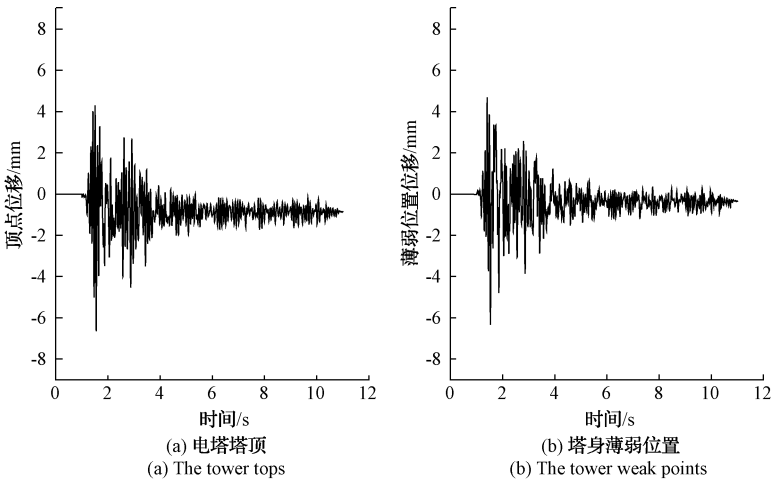


图 9 D3 地震垂直荷载
Fig. 9 D3 seismic vertical loading

对输电塔进行动力响应分析,选取输电塔顶点位移、塔身 薄弱位置位移作为输电塔在水库地震水平方向分量下的

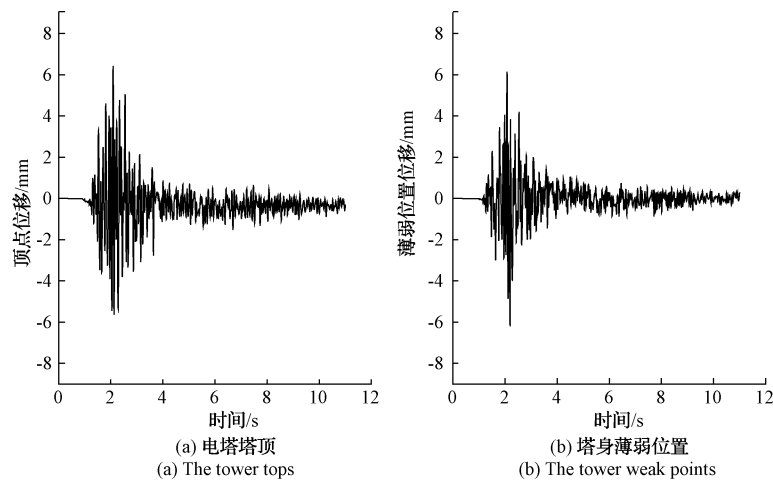


图 10 D4 地震垂直荷载
Fig. 10 D4 seismic vertical loading

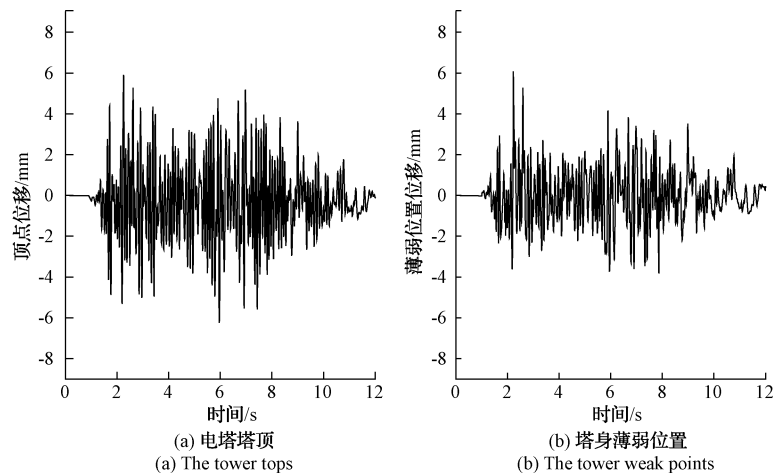


图 11 D5 地震垂直荷载
Fig. 11 D5 seismic vertical loading

响应指标。

地震水平分量沿 z 轴正方向施加于输电塔塔脚,输电塔重力荷载沿 y 轴负方向在输电塔上均匀分布。通过改变地震荷载模拟在不同地震情况下输电塔响应,得出塔身薄弱位置和顶点最大位移如表 3 所示。

表 3 地震水平荷载下最大位移		
Table 3 Maximum displacement under seismic horizontal load		
(mm)		
地震荷载	塔身薄弱位置	顶点
D1	8.932	17.022
D2	7.271	14.448
D3	7.741	14.893
D4	8.212	15.458
D5	7.103	14.551

在水平方向地震荷载作用下,输电塔塔顶位移量远大

于塔身薄弱位置位移量。由于输电塔整体高度较高,塔身横截面相对较小,导致输电塔大多为高耸结构。当承受水平方向荷载时,输电塔高耸结构对水平方向地震存在一定放大作用,使得输电塔顶点位移量增大。在 D1 荷载下塔身薄弱位置位移量高于 D2~D5 地震荷载,塔身薄弱位置位移量分别增大 1.661、1.191、0.72、1.829 mm。

选择输电塔顶点和塔身薄弱位置进行分析,得到 D1~D5 地震水平荷载下输电塔塔顶和塔身薄弱位置的位移随时间变化曲线,如图 12~16 所示。

可以看出,在不同地震荷载下,输电塔位移量最终在较小范围内变动,说明输电塔并未出现失稳现象。从不同荷载下位移曲线来看,输电塔顶点和塔身薄弱位置位移曲线变化趋势基本一致,曲线重合度较高,在荷载逐渐减小时位移量逐渐回归到某一固定值附近,仅在两个节点稳定值之间存在一定差异,由此说明在单次水库地震作用下,输电塔处于稳定状态并未出现失稳。在 6 级水库地震荷载时,塔身薄弱位置出现的最大位移为 8.932 mm,顶点的

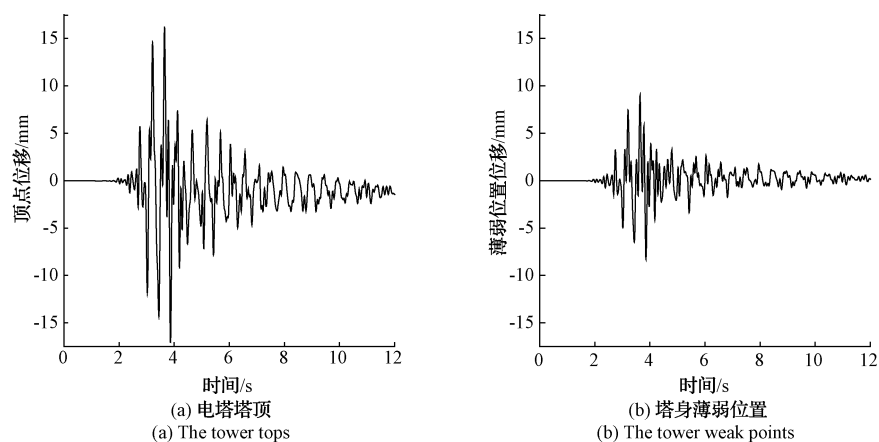


图 12 D1 地震水平荷载

Fig. 12 D1 seismic horizontal loading

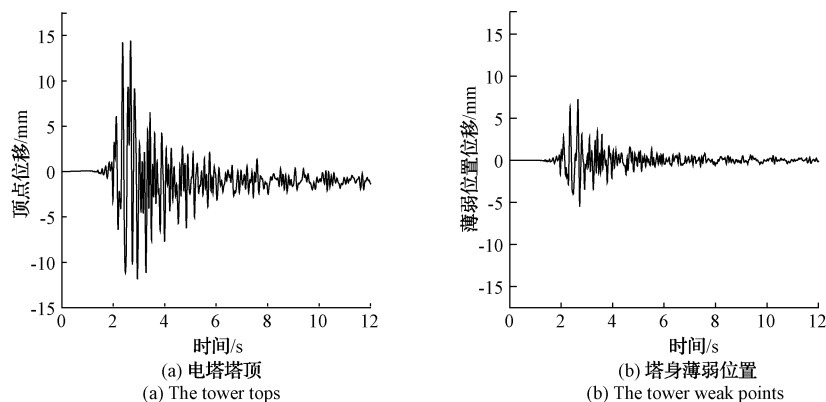


图 13 D2 地震水平荷载

Fig. 13 D2 seismic horizontal loading

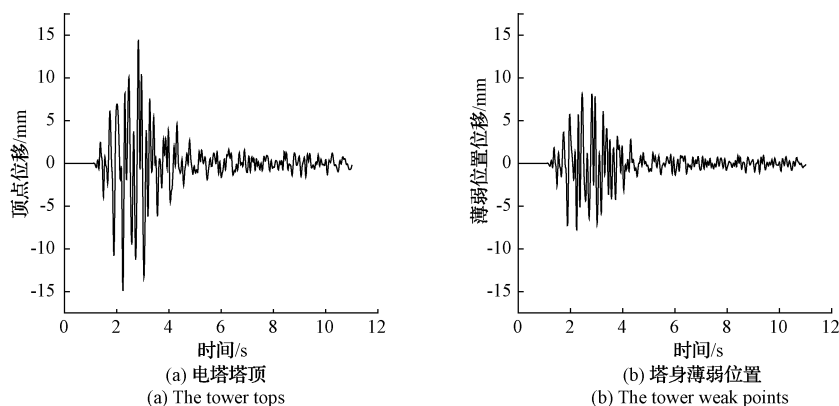


图 14 D3 地震水平荷载

Fig. 14 D3 seismic horizontal loading

最大位移为 17.022 mm,当地震波时间超过 7 s 时,输电塔顶点位移曲线在 -1.25 mm 附近波动,说明输电塔顶点出现一定程度向下偏移,偏移量约为 1.25 mm。从位移曲线上看,在 D1、D2、D4 荷载下偏移明显。与竖直荷载相比,水平荷载下输电塔位移量更大,可以看出在水库地震

作用下水平分量对输电塔的影响更强烈。

4 加固措施及效果分析

输电塔塔身部位仅有主材起支撑作用,在水库地震环境下,塔身杆件容易因受不平衡应力作用产生翻转,因此

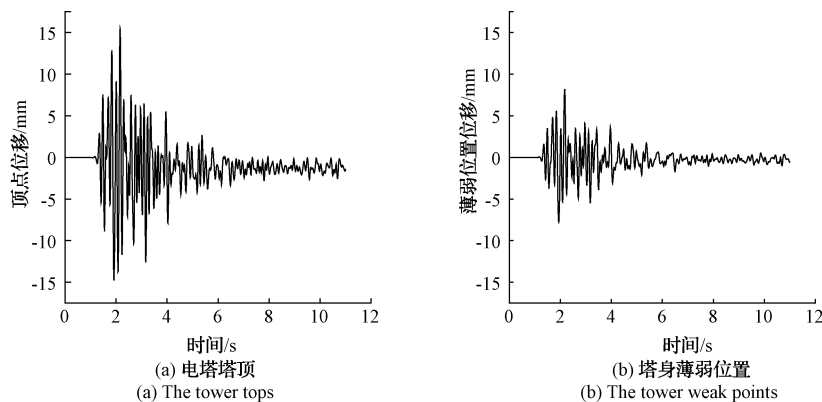


图 15 D4 地震水平荷载

Fig. 15 D4 seismic horizontal loading

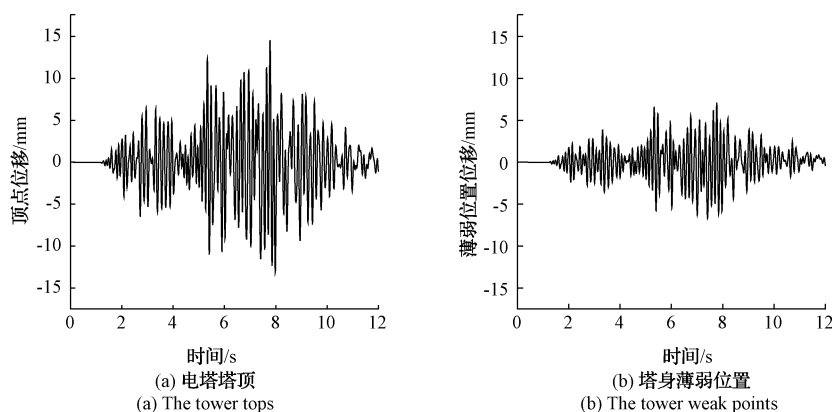


图 16 D5 地震水平荷载

Fig. 16 D5 seismic horizontal loading

在输电塔薄弱位置进行局部加固来提高输电塔的整体稳定。近几年来,许多专家学者对碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)修复金属结构开展了大量研究。王中强等^[13]基于数值方法从动力特性、地震响应和地震易损性 3 个角度出发,研究螺栓滑移对角钢输电塔的影响,结果表明螺栓滑移会显著增加角钢输电塔在地震作用下的主材轴力响应和塔身位移响应。胡国华等^[14]建立了 Q345 钢在疲劳试验中疲劳裂纹萌生与扩展的关系模型,通过实验证明,粘贴的 CFRP 层数越多加固效果越好,当使用 CFRP 层数为 2 层时,其利用率最大;加固后钢管的屈服强度和抗变形能力明显提高。

保证输电塔其他部位杆件不变,对部分主材角钢构件采用环包粘贴双层 CFRP 材料进行加固,如图 17 所示。

在建立输电塔加固模型时,参考文献^[15]确定 CFRP 加固材料为弹性本构模型,材料单层厚度为 0.167 mm,密度为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$,弹性模量为 137 GPa,抗拉强度为 2.1 GPa。对主材与加固材料使用绑定约束,确保加固材料与主材之间不发生相对位移。主材加固部位如图 18 所示。

对输电塔进行加固后,使用 D1 地震荷载对加固后模

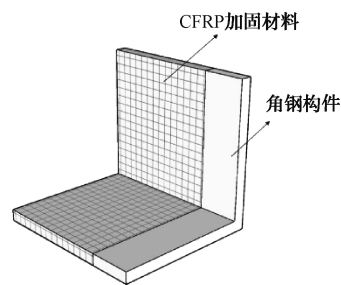


图 17 加固材料粘贴示意图

Fig. 17 Schematic diagram of reinforcement attachment

型进行校验,加固后主材位移曲线如图 19 所示。

从图 19 可以看出,使用 CFRP 加固前后相同情况下输电塔整体位移趋势基本相同。加固后顶点最大位移值由 18.524 mm 降至 16.253 mm,相比加固前最大位移值降低 12.26%;塔身应力集中部位最大位移值由 7.932 mm 降至 7.144 mm,最大位移比值降低 9.34%;塔腿最大位移由 4.662 mm 降至 4.216 mm,最大位移比值降低 9.57%。说明采取 CFRP 加固方法能有效提高输电塔薄弱位置承

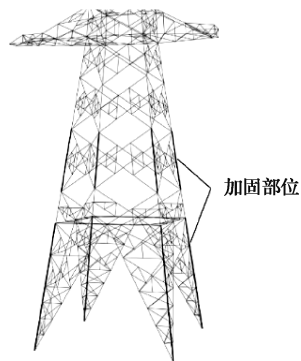


图 18 输电塔加固部位

Fig. 18 Transmission tower reinforcement sites

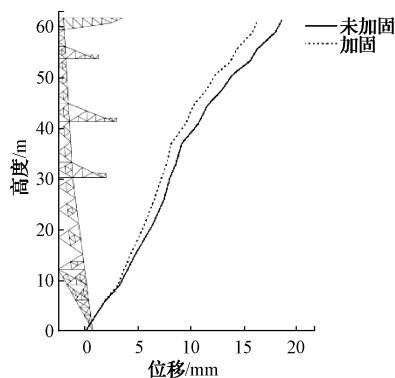


图 19 加固前后主材最大位移对比

Fig. 19 Comparison of maximum displacement of main material before and after reinforcement

载能力。

5 结 论

本文以白鹤滩库区水库地震频发环境为背景,基于水库地震特征选取地震记录作为激励,以 500 kV 双回路输电塔为研究对象,计算了水库地震作用下输电塔位移特性,结论如下。

1) 水库地震作用下输电塔薄弱位置主要分布在塔腿和塔身的部分主材杆件。

2) 在 6 级水库地震荷载下,输电塔并未出现失稳或杆件失效情况,水平方向荷载对塔身影响更明显;竖直方向荷载下塔身最大位移为 7.632 mm,塔顶最大位移为 8.541 mm;水平方向荷载下塔身最大位移为 8.932 mm,塔顶最大位移为 17.022 mm。

3) 针对输电塔塔身塔腿薄弱位置进行局部加固,在相同荷载下,塔顶最大位移降低 12.26%,塔身及塔腿最大位移降低 9%。加固措施可以有效提高输电塔应对水库地震的能力,对研究输电塔抗震加固提供一定理论支撑。

参 考 文 献

[1] 路永强. 三峡库区湖北段水库地震规律性研究及趋势

预测[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.

LU Y Q. Research on the regularity of reservoir earthquakes in the Hubei section of the Three Gorges Reservoir area and trend prediction [D]. Yichang: Three Gorges University, 2021.

[2] 代一鸣, 张莉丽, 李京海, 等. 三峡水库的地震与蓄水位关系分析[J]. 防灾科技学院学报, 2023, 25(3): 18-28.

DAI Y M, ZHANG L L, LI J H, et al. Analysis of the relationship between earthquakes and water storage level in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Disaster Prevention Science and Technology Institute, 2023, 25(3): 18-28.

[3] 赵策. 金沙江下游地区水库地震活动特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2020.

ZHAO C. Characterization of reservoir seismicity in the lower Jinsha River region [D]. Beijing: Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, 2020.

[4] 赵仰康. 脉冲型地震作用下猫头型输电塔整体抗倒塌能力研究[D]. 保定: 河北大学, 2022.

ZHAO Y K. Study on the overall collapse resistance of catenary-type transmission towers under impulse-type seismic action [D]. Baoding: Hebei University, 2022.

[5] 王飞. 特高压输电线路杆塔结构抗震性能研究[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2020.

WANG F. Research on seismic performance of tower structure of ultra-high voltage transmission line [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020.

[6] 陈龙强, 张德凯, 邓洪洲. 大跨越输电塔线体系地震时程响应研究[J]. 特种结构, 2020, 37(5): 23-28.

CHEN L Q, ZHANG D K, DENG H ZH. Study on the seismic time-range response of large span transmission tower line system [J]. Special Structures, 2020, 37(5): 23-28.

[7] 陈大斌, 李东亮, 朱瑞民, 等. 输电铁塔强震抗灾能力分析[J]. 电力建设, 2013, 34(5): 76-79.

CHEN D B, LI D L, ZHU R M, et al. Analysis of strong seismic resilience of power transmission towers [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(5): 76-79.

[8] 刘雅. 500 kV 输电塔线体系抗地震性能分析与研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.

LIU Y. Analysis and research on seismic performance of 500 kV transmission tower line system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.

- [9] 周强. 基于性能的输电塔地震易损性分析与抗震设计[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
ZHOU Q. Performance-based seismic susceptibility analysis and seismic design of transmission towers [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [10] 杨保卫. 特高压输电塔结构地震响应及抗震可靠度分析[D]. 保定: 河北大学, 2024.
YANG B W. Analysis of seismic response and seismic reliability of extra-high voltage transmission tower structures [D]. Baoding: Hebei University, 2024.
- [11] 代紫兰. 输电塔加固腹杆角钢构件承载能力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
DAI Z L. Research on bearing capacity of angle steel members of reinforced web of transmission tower [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [12] 刘树林. 频发微小地震作用下库区层状岩质边坡的累积损伤及动力稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LIU SH L. Study on cumulative damage and dynamic stability of laminated rocky slopes in reservoir area under the action of frequent micro earthquakes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [13] 王中强, 李勋宇. 考虑螺栓滑移效应的角钢输电塔抗震性能研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 85-91.
WANG ZH Q, LI X Y. Study on seismic performance of angle steel transmission tower considering bolt slip effect [J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2024, 46(1): 85-91.
- [14] 胡国华, 丁真真, 朱泉水, 等. 基于声发射的 Q345B 钢失稳断裂模式识别[J]. 无损检测, 2018, 40(2): 15-19.
HU G H, DING ZH ZH, ZHU Q SH, et al. Stability fracture pattern recognition of Q345B steel based on acoustic emission [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(2): 15-19.
- [15] 邱经纬. 基于 CFRP 环包加固的梁柱边节点抗震性[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(8): 26-28.
QIU J W. Seismic resistance of beam-column edge nodes based on CFRP ring pack reinforcement [J]. China Building Metal Structure, 2024, 23(8): 26-28.

作者简介

邹英杰, 硕士研究生, 主要研究方向输电塔稳定性分析。

E-mail: 19071392036@163.com

段国勇, 博士, 主要研究方向为电气工程、输电线路工程。

E-mail: 287079344@qq.com

芮焘, 硕士研究生, 主要研究方向为输电塔稳定性分析及算法优化。

E-mail: 2843587398@qq.com