

基于整体易损性的猫头型输电塔抗倒塌能力分析

宋鹏彦^{1,2}, 赵仰康^{*1,2}, 杨保卫^{1,2}

(1. 河北大学 建筑工程学院, 保定 071002; 2. 河北省土木工程监测与评估技术创新中心, 保定 071002)

摘要:作为输电线路的主要组成部分,输电塔结构对地震作用非常敏感。本文以中国输电线路中常采用的猫头型输电塔结构为例,开展了输电塔结构整体抗地震倒塌能力分析。以某一实际单回路3个不同高度的直线塔为研究对象,基于OpenSees平台建立输电塔结构三维有限元模型,定义4个倒塌极限状态依据,选取20条远场地震动记录,采用增量动力分析(IDA)方法,得到4个倒塌极限状态依据下输电塔结构的倒塌点,进一步获得输电塔结构的倒塌易损性曲线及其潜在失效杆件,并评估其不同水平设计地震作用下的倒塌裕度比。研究结果表明,猫头型输电塔的地震损伤主要集中在塔头位置;随着塔体高度的增高,猫头型输电塔抗地震倒塌能力减弱;猫头型输电塔在巨震作用下存在一定的倒塌风险。

关键词:猫头型输电塔结构;倒塌极限状态;潜在失效杆件;抗倒塌能力;倒塌易损性

中图分类号: TU375.4; O327

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2023)05-0710-08

1 引言

作为输电塔线路的主要载体,输电塔结构具有结构高耸、重量轻、阻尼小和整体柔性等特征。这些特征造成输电塔结构对地震作用非常敏感,因地震导致的输电塔破坏现象时有发生。如日本Kobe地震中,大约有20座输电塔发生较明显的破坏;台湾Chi-Chi地震中,有15座输电塔发生倒塌;在中国近年来发生的汶川地震和芦山地震中,分别有26座输电塔发生显著倾斜和20个输电塔发生严重破坏。输电塔结构在地震作用下发生破坏会导致电力中断,造成巨大的经济损失,还会显著影响震后救援速度,造成不必要的人员伤亡。因此,确保输电塔结构在地震作用下的安全十分必要。实现这一目标的前提是研究清楚输电塔在地震作用下的倒塌和失效机理。

近年来,国内外学者围绕输电塔结构的抗震倒塌能力开展了一系列研究。Zheng等^[1]研究了输电塔倒塌模式受结构杆件破坏规律和不同地震动输入的影响规律,揭示了显式动力分析方法分析输电塔地震倒塌过程的优势。盖霞等^[2]基于动力显式分析方法,对输电塔进行多维地震激励下倒塌模

拟,总结了输电塔的极限承载力和杆件屈曲情况,并判别其倒塌位置。田利等^[3,4]将导(地)线简化为节点质量,将输电塔-线体系简化为单塔模型,对某输电塔进行地震作用下的倒塌分析,获得了输电塔在地震作用下的薄弱部位和地震倒塌全过程。雷旭等^[5]研究了输电塔结构的材料和几何参数等不确定性因素对输电塔倒塌状态和倒塌失效路径的影响。Long等^[6]基于理想型双线性本构模型,利用有限元质点法模拟了单向地震动激励下输电塔倒塌过程,验证了有限元质点法的准确性。孙珩^[7]基于有限元质点法模拟输电塔结构在地震作用下的倒塌过程,研究了不同峰值加速度和多维地震作用下输电塔的地震倒塌失效模式。袁光英等^[8]基于ABAQUS软件研究了输电塔-线体系在3种不同地震波作用下的倒塌破坏过程与倒塌机理。

尽管输电塔结构的抗地震倒塌能力已经得到了研究人员的关注,但仍有以下几个问题没有得到很好的解决。(1)中国单回路直线塔按塔头外形样式主要分为猫头型和干字型两大类。目前,猫头型输电塔在我国实际工程中使用频率较高,但关于其抗地震倒塌能力方面的研究相对较少;(2)目前,关于输电塔风致倒塌的研究相对较多^[9,10],然而,由于荷载激励的不同,输电塔在地震作用下的倒塌失效机理与其在风荷载作用下的倒塌失效机理不同,亟待进行深入研究;(3)目前对输电塔的地震倒塌判定准则尚未统一,不同倒塌判定原则对输电塔抗地震倒塌能力的影响尚不清楚,值得进一

收稿日期:2022-05-25;修改稿收到日期:2023-07-20.

基金项目:中国地震局工程力学研究所基金(2019EEVL0202);
河北省自然科学基金青年基金(E2017201221)资助项目.

作者简介:赵仰康^{*}(1996-),男,硕士生
(E-mail:741929575@qq.com).

步研究。

针对上述问题,本文以实际工程中 3 个不同高度的猫头型输电塔为研究对象,采用增量动力分析方法,开展猫头型输电塔结构整体抗地震倒塌能力分析,获得了猫头型输电塔地震倒塌易损性曲线,确定了猫头型输电塔倒塌裕度比,识别了猫头型输电塔的地震倒塌潜在失效杆件,对比评估了不同倒塌定义原则对输电塔结构抗地震倒塌能力的影响。

2 输电塔结构的设计与建模

2.1 猫头型输电塔的设计

以中国某城市运行的实际输电线路为背景,该线路中某单回路直线塔中猫头型输电塔为研究对象。考虑输电塔高度的影响,选取塔高分别为 29.1 m,26.1 m 和 20.1 m 的三个典型猫头型输电塔,其塔高分别为 24 m,21 m 和 18 m,根开分别为 4.14 m,3.78 m 和 3.42 m。输电塔塔身平面为正方形,塔架的各个塔腿标高均是以杆塔中心桩为基准,如图 1 所示。其中,截面均采用 L 型钢。

输电塔的主材、斜材和辅材均采用 Q235 和 Q345 角钢。选择的输电塔抗震设防标准为 8 度,设计基本地震加速度为 0.2g,II 类场地土,第二组设计抗震分组,场地特征周期 T_g 为 0.40 s。

2.2 有限元建模与验证

本文输电塔杆件采用考虑剪切变形的 Timoshenko 空间梁单元来模拟,24 m 输电塔、21 m 输电塔和 18 m 输电塔有限元模型节点数量分别为 391,371 和 343,单元数量分别为 1042,996 和 920,塔腿底部

采用固定约束,并未考虑土与结构的相互作用。输电线分为导线和地线,其中导线 2 层共 4 根,地线 1 层共 1 根。导线采用双分裂 JL/LB20A-630/45 型铝包钢芯铝绞线,地线采用 OPGW-105 型光缆,绝缘子采用 FXBW3-220/100-C 型复合绝缘子。本文没有考虑塔体与导线的耦合作用,这是因为顺导线方向地震激励下的输电塔响应最为明显,而导线和地线简化为节点质量的简化模型与塔线体系模型在地震激励下的振动特点及振动响应差别不大^[11]。为简化计算,本文采用将导线、地线以及绝缘子简化为节点质量的方法,建立简化有限元模型,且仅研究顺导线方向地震激励下的猫头型输电塔动力响应。输电塔简化有限元模型,如图 2 所示。

输电塔在平面方向(顺导线方向)为 X 轴,在平面方向(垂直导线方向)为 Y 轴,沿塔高方向为 Z 轴。主材、斜材和辅材材料均采用 Steel02^[12] 材料本构来模拟,该材料本构具有计算速度快、与反复加载试验结果吻合度高和可以反应包辛格效应等优点,并未考虑杆件屈曲对输电塔抗震性能的影响;Q235 和 Q345 钢材的硬化系数为 0.01;L 型钢截面均采用纤维截面,如图 3 所示。

为了验证本文建立的猫头型输电塔结构有限元模型的正确性,采用 SAP2000 有限元软件建立与 OpenSees 软件同节点共约束的三维输电塔有限元模型。两种软件分析获得的输电塔的前三阶模态分析结果列入表 1。由表 1 可知,OpenSees 和 SAP2000 计算出的前三阶周期十分接近,相差不超过 5%,这也从一个侧面验证了本文建立的输电塔有限元模型的准确性^[13]。

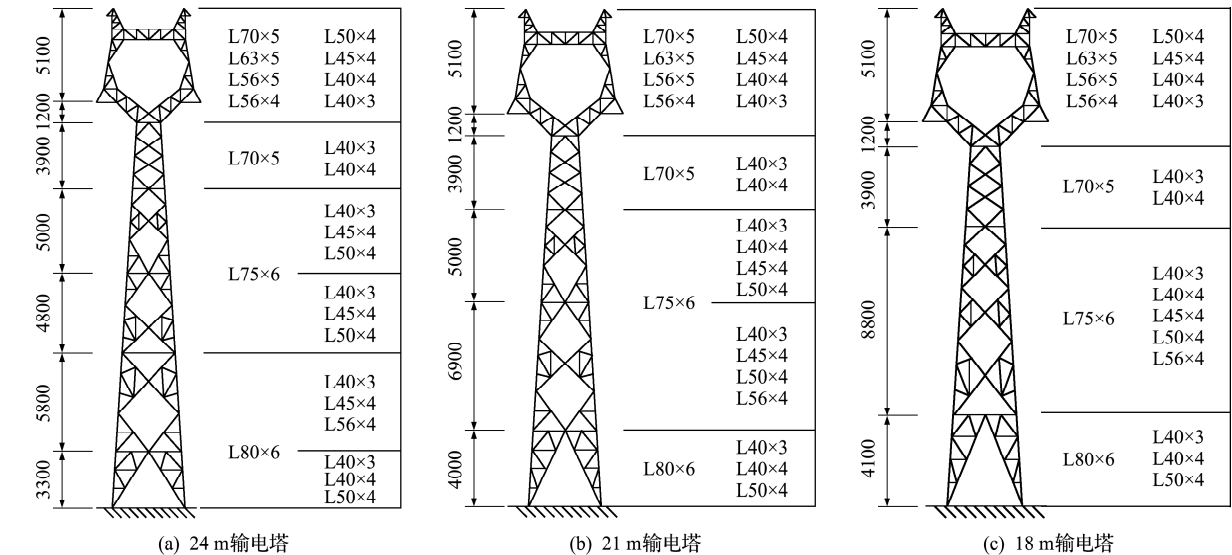


图 1 不同高度算例输电塔的立面及截面尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Elevation and the sectional geometry of transmission tower structures with varying height(unit:mm)

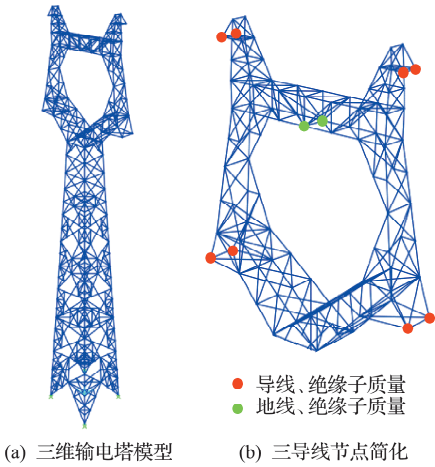


图2 输电塔结构的有限元模型
Fig. 2 Finite element model of transmission tower

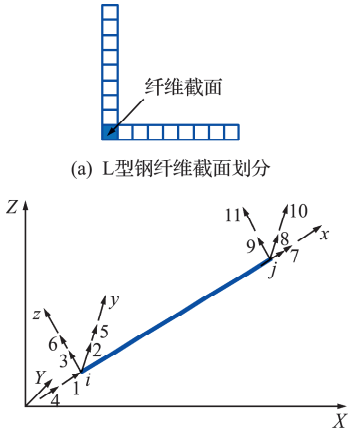


图3 L型钢纤维截面
Fig. 3 L section steel fiber section

表 1 基于 OpenSees 和 SAP2000 的输电塔前三阶周期对比(单位:s)
Tab. 1 Between first three periods of transmission tower obtained by OpenSees and SAP2000(unit:s)

周期	塔高 24 m			塔高 21 m			塔高 18 m		
	OpenSees	SAP2000	差值/%	OpenSees	SAP2000	差值/%	OpenSees	SAP2000	差值/%
第一周期	0.4192	0.4011	4.32	0.3678	0.3554	3.37	0.3232	0.3174	1.79
第二周期	0.4123	0.3989	3.25	0.3597	0.3521	1.62	0.3193	0.3136	1.78
第三周期	0.1634	0.1557	4.71	0.1353	0.1297	4.14	0.1307	0.1283	1.84

3 输电塔结构增量动力分析

3.1 倒塌极限状态的判定

本文采用如下四种输电塔结构倒塌极限状态定义原则。

- (1) 依据 1^[8]。以输电塔塔顶最大水平位移超过 $H/78$ 作为输电塔结构倒塌状态的判定原则。
- (2) 依据 2^[14]。以输电塔顶部向位移角(即塔顶水平位移与塔高的比值)为 $\theta_T=1/75$ 作为输电塔结构倒塌状态的判定原则。
- (3) 依据 3^[15]。以输电塔横隔层的层间位移角为 $\theta_{max}=1/50$ 作为输电塔结构倒塌极限状态的判定原则。
- (4) 依据 4^[16]。以输电塔结构中有构件发生屈服来作为输电塔结构倒塌极限状态的判定原则。

上述四个倒塌极限状态判定依据如图 4 所示。

3.2 倒塌极限状态的判定

采用文献[17]的 20 条地震动记录,对输电塔结构进行 IDA 分析,获得对应不同倒塌状态定义原则的输电塔结构倒塌点。采用地震动的峰值加速度 PGA 作为地震动强度参数。

图 5 给出了 24 m,21 m 和 18 m 输电塔结构的 IDA 曲线,以及对应依据 1、依据 2 和依据 3 的极限状态倒塌点。图 6 给出了输电塔结构的杆件达到屈服强度时(依据4)对应的地震动峰值加速

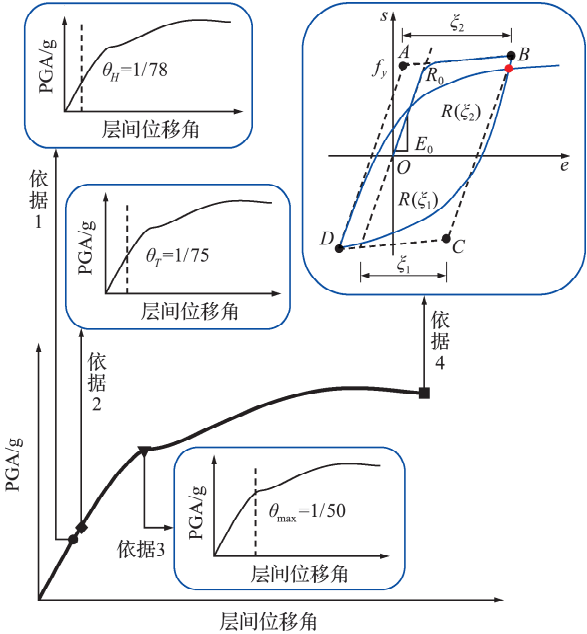


图4 不同倒塌极限状态依据
Fig. 4 Different collapse limit stste basis

度 PGA。从图 5 和图 6 可以看出,随着输电塔结构高度的降低,相同依据下,同一条地震动对应倒塌点的峰值加速度 PGA 呈增大趋势。

3.3 潜在失效杆件的识别

对输电塔进行 IDA 分析,得到 IDA 曲线,倒塌时刻对应的 PGA,依据 1<依据 2<依据 3<依据 4。依据 1 为学者提出,其普遍性有待验证;依

据 3 将输电塔按横隔划分为层,按照层间位移角来考虑;依据 4 从材料层面来考虑,杆件达到屈服强度,其倒塌点对应的 PGA 远大于实际输电塔结构对应的 PGA,而现实中输电塔的破坏主要是失稳造成的;依据 2 按照高耸结构规范能直观反应输电塔反应。

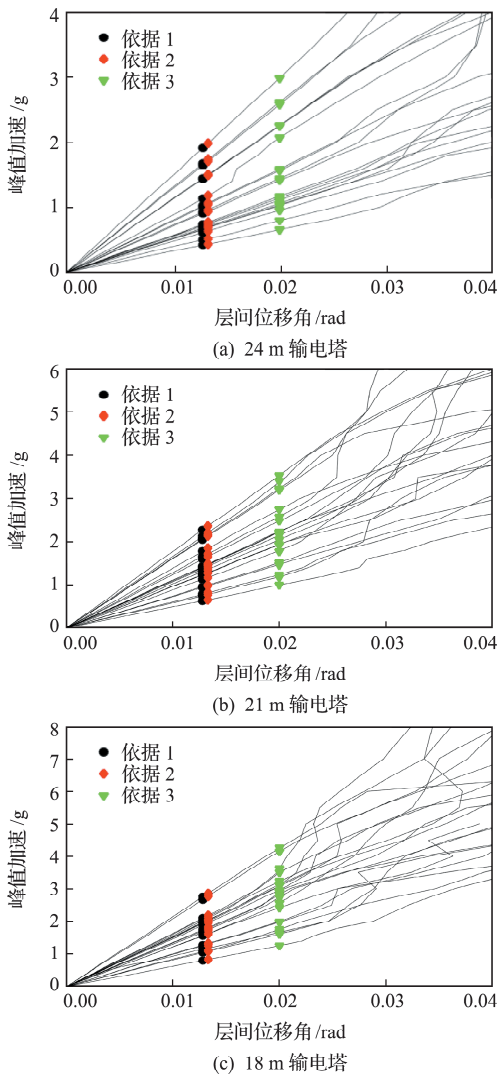


图 5 3 个不同依据下的倒塌极限状态

Fig. 5 Collapse limit states under 3 different bases

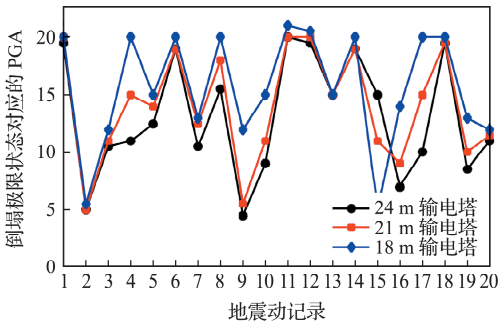


图 6 采用依据 4 判断倒塌极限状态对应的 PGA

Fig. 6 PGA values corresponding to the collapse limit state using criterion 4

由于不同形状输电塔和荷载的作用形式不同,其潜在失效杆件位置不同,本节仅研究猫头型输电塔结构在地震作用下的潜在失效杆件。

以依据 2 为例,给出不同高度的猫头型输电塔地震作用下潜在失效杆件。通过结构发生失效状态时的输电塔架的顶部位移限值为塔架高度与 1/75 的比值分布规律。按照高度不同,给出了相应的潜在失效杆件出现的位置,如图 7 所示。可以看出,猫头型输电塔达到倒塌极限状态时,其失效杆件集中在塔头,这主要是由于猫头型输电塔的塔头部分质量较大且杆件连接复杂造成的。对于不同高度的输电塔,类型相同,其潜在失效杆件位置大致相同。

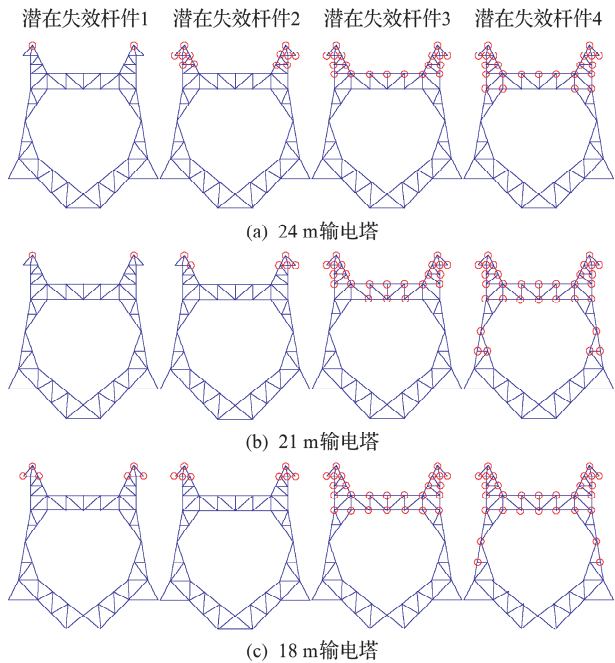


图 7 不同高度输电塔失效模式

Fig. 7 Different high power transmission tower failure mode

4 输电塔结构抗倒塌能力分析

4.1 倒塌易损性分析

倒塌易损性描述了给定地震强度下结构的倒塌概率。基于 IDA 曲线得到的结构倒塌点 PGA 以及倒塌极限状态^[17-19]对应依据 4 的屈服强度,通过对数正态分布函数拟合绘制倒塌易损性曲线。

$$P(C|IM=x)=\Phi[(\ln PGA-\ln \tilde{\alpha})/\tilde{\beta}] \quad (1)$$

式中 $\tilde{\alpha}$ 为倒塌强度中位数, $\tilde{\beta}$ 为地震动强度指标的标准差。

$$\ln \tilde{\alpha}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \text{PGA}_i \quad (2)$$

$$\tilde{\beta}=\sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\ln \text{PGA}_i-\ln \tilde{\alpha})^2} \quad (3)$$

式中 n 为地震动记录个数, PGA_i 为结构发生倒塌时对应的第 i 条地震动记录的峰值加速度 PGA。

图 8 给出了 4 个依据下的不同高度输电塔结构倒塌易损性曲线。从倒塌易损性曲线可以看出, 依据 4 对猫头型输电塔结构的抗倒塌能力评估远高于依据 1、依据 2 和依据 3, 采用依据 4 作为判断

指标远高估了输电塔的抗倒塌能力且不符合实际地震下输电塔反应规律。依据 1 和依据 2 对猫头型输电塔结构的抗倒塌能力评估低于依据 3。依据 1 和依据 2 的抗倒塌能力相近。随着输电塔高度的增加, 采用同一依据去评估其抗倒塌能力, 其高度越高, 抗倒塌能力越弱。

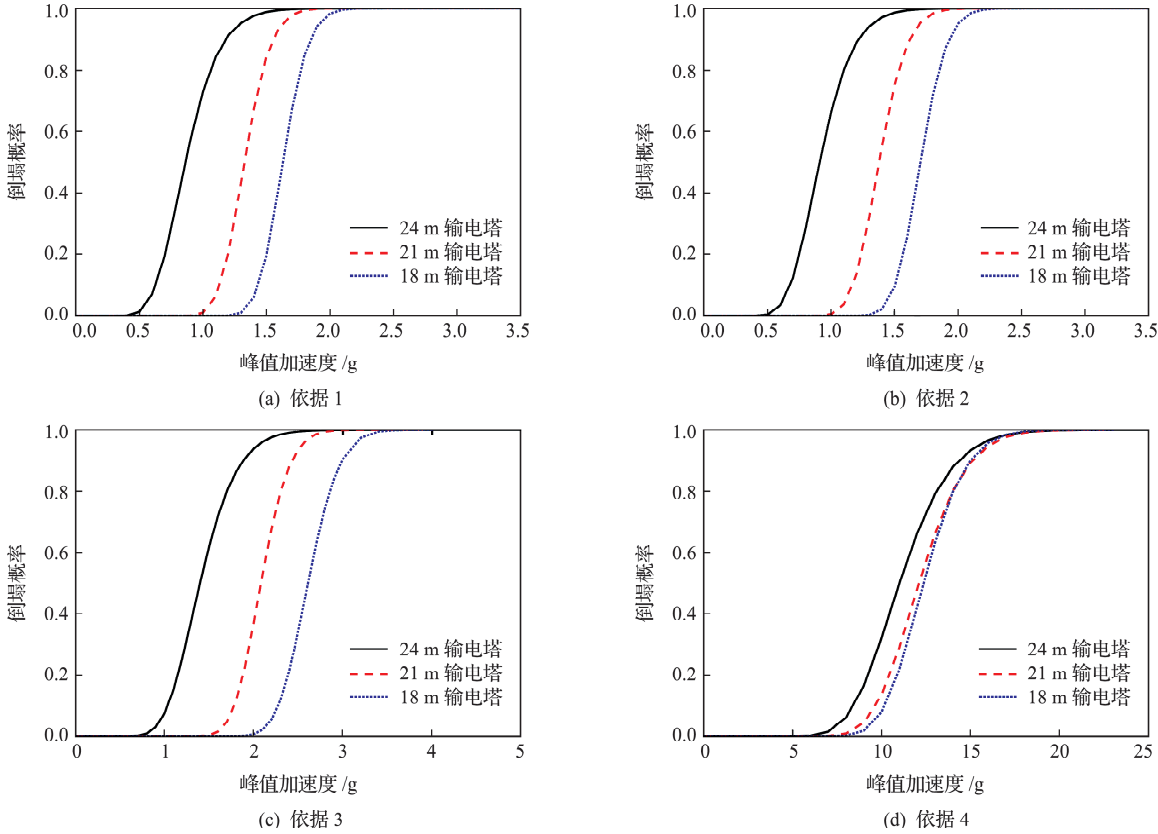


图 8 不同高度输电塔倒塌易损性曲线
Fig. 8 Collapse vulnerability curve of transmission towers at different heights

4.2 倒塌裕度比分析

中国抗震规范采用峰值加速度(PGA)作为地震强度参数(IM), 本文在计算倒塌裕度比(CMR)^[20]时均调整为峰值加速度(PGA)的形式。以抗倒塌为目标进行地震动参数区划, 以一致倒塌风险为设防目标进行结构抗震设计的最新发展趋势^[21], 研究输电塔结构在大震(罕遇地震)和巨震(极罕遇地震)作用下的安全性能, 同时选取大震(罕遇地震)以及巨震(极罕遇地震)水平的峰值加速度(PGA)作为最大考虑地震动(MCE)。

$$CMR = \begin{cases} CMR_M = PGA_{50\% \text{倒塌}} / PGA_M \\ CMR_G = PGA_{50\% \text{倒塌}} / PGA_G \end{cases} \quad (4)$$

式中 $PGA_{50\% \text{倒塌}}$ 为结构倒塌概率为 50% 对应的峰值加速度(PGA), PGA_M 为抗震规范中大震(罕遇地震)对应的峰值加速度值(PGA), PGA_G 为巨震(极罕遇地震)对应的峰值加速度值(PGA), 根据

文献[22], 本文取值为地震动区划图中巨震及不同学者提出的巨震。

基于倒塌易损性曲线, 图 8 为依据 1~依据 4 下结构倒塌概率为 50% 对应的峰值加速度 PGA。24 m 输电塔不同依据的倒塌裕度比列入表 2。由表 2 可知, 大震作用下 ($PGA = 0.4 \text{ g}$), 依据 1、依据 2、依据 3 和依据 4 的 CMR 分别为 2.186, 2.376, 3.500 和 27.578。可见, 对于同一高度的输电塔, CMR 值的关系为判据 1 < 判据 2 < 判据 3 < 判据 4。

巨震作用下, 依据 1、依据 2 和依据 3 的 CMR 分别为 1.061~1.507, 1.152~1.639 和 1.697~2.413。巨震 0.58g 情况下, 依据 3 相对于依据 1 和依据 2, CMR 提高了 37.54% 和 32.08%。图 9 分别给出了 21 m 输电塔和 18 m 输电塔 4 个依据下输电塔结构对应的倒塌裕度比。可见, 无论是在

大震还是巨震作用下,随着输电塔高度的增大CMR 值在降低。

表 2 输电塔不同依据对应倒塌裕度比
Tab.2 MR of different indexes of 24 m transmission tower

类型	倒塌依据	PGA _{50%倒塌}	PGA _{M或G}	CMR
大震	依据 1	0.874	0.400g ^[23]	2.186
	依据 2	0.951		2.376
	依据 3	1.400		3.500
	依据 4	11.031		27.578
巨震 1	依据 1	0.874	0.580g ^[24]	1.507
	依据 2	0.951		1.639
	依据 3	1.400		2.413
	依据 4	11.031		19.019
巨震 2	依据 1	0.874	0.620g ^[25]	1.410
	依据 2	0.951		1.533
	依据 3	1.400		2.258
	依据 4	11.031		17.792
巨震 3	依据 1	0.874	0.719g ^[26]	1.216
	依据 2	0.951		1.322
	依据 3	1.400		1.947
	依据 4	11.031		15.342
巨震 4	依据 1	0.874	0.825g ^[22]	1.060
	依据 2	0.951		1.152
	依据 3	1.400		1.697
	依据 4	11.031		13.371

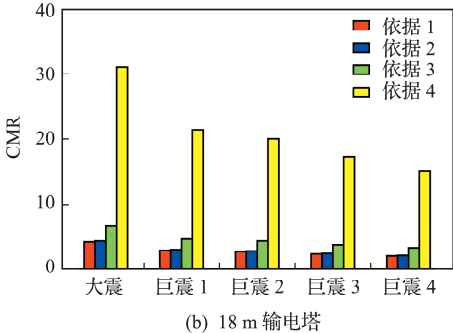
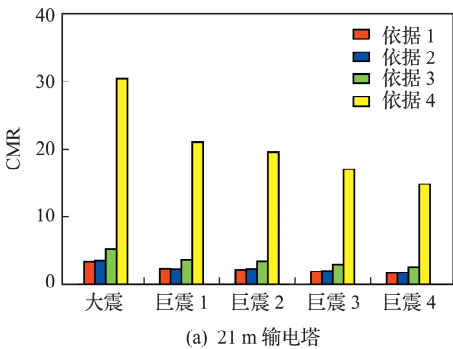


图 9 不同依据对应倒塌裕度比
Fig. 9 CMR of different indexes

5 结 论

本文从数值模拟角度出发,以某单回路直线塔中不同高度的猫头型输电塔为研究对象,基于OpenSees 有限元软件平台建立了三维输电塔有限

元模型。考虑不同依据下的倒塌极限状态,对输电塔结构进行潜在杆件的判定,基于此,进一步对输电塔结构抗倒塌能力进行评估。得到的主要结论如下。

- (1) 以 4 个倒塌极限状态判断为依据,发现基于依据 1 和依据 2 为极限指标的 IDA 分析,两者所得结果差距不是很大,以依据 3 为极限指标对倒塌的评估要高于依据 1 和依据 2,以依据 4 为极限指标的评估要远高于其他三种,偏于保守。
- (2) 基于不同高度的猫头型输电塔,确定了输电塔的潜在失效杆件,发现其主要集中在猫头型的塔头,这主要是由于塔头的质量较大造成的。
- (3) 输电塔结构在地震作用下,随着高度的增加,其抗倒塌能力变弱。在大震(PGA=0.4 g)作用下,以依据 1、依据 2 和依据 3 为指标,输电塔结构具有较好的安全储备性能;在巨震作用下,输电塔结构高度越高越容易发生倒塌破坏。在大震作用下发生倒塌的概率较小,但对于巨震存在一定的倒塌风险。

参考文献(References):

[1] Zheng H D,Fan J,Long X H. Analysis of the seismic collapse of a high-rise power transmission tower structure [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, **134**:180-193.

[2] 盖霞,田利.多维地震激励下考虑构件滞回性能的输电塔倒塌分析[J]. *地震工程学报*, 2020, **42**(2): 352-359. (GAI Xia, TIAN Li. Collapse analysis of transmission tower considering hysteretic behavior of components under multi-dimensional earthquake excitation [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, **42**(2):352-359. (in Chinese))

[3] Tian L,Liu K M. Uncertainty analysis of the dynamic responses of a transmission tower-line system subjected to cable rupture [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, **34**(1):1-8.

[4] Tian L,Yi S Y,Qu B. Orienting ground motion inputs to achieve maximum seismic displacement demands on electricity transmission towers in near-fault regions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, **144**(4): 1-13.

[5] 雷旭,付兴,肖凯,等.强风作用下输电塔结构不确定性倒塌分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, **38** (S1):266-274. (LEI Xu,FU Xing,XIAO Kai, et al. Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method [J]. *Proceedings*

- of the CSEE, 2018, **38**(S1):266-274. (in Chinese))
- [6] Long X H, Wang W, Fan J. Collapse analysis of transmission tower subjected to earthquake ground motion [J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, **2018**:2687561.
- [7] 孙 珩. 基于有限质点法的地震作用下输电塔倒塌模拟[D]. 华中科技大学, 2016. (SUN Heng. Simulation of Transmission Tower Collapse under Earthquake Based on Finite Particle Method [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))
- [8] 袁光英, 潘海洋, 马瑞升, 等. 考虑不同地震输入方向的输电塔-线体系连续性倒塌研究[J]. 地震工程学报, 2020, **42**(4): 840-846. (YUAN Guang-ying, PAN Hai-yang, MA Rui-sheng, et al. Study of progressive collapse of transmission tower-line system considering different incident angles of earthquake waves [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, **42**(4): 840-846. (in Chinese))
- [9] 陈 正, 唐可人, 周 强, 等. 风荷载作用下输电塔极限承载力和失效模式计算模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, **35**(2): 47-55. (CHEN Zheng, TANG Ke-ren, ZHOU Qiang, et al. Calculation models of ultimate bearing capacity and failure modes for transmission tower under wind load [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, **35**(2): 47-55. (in Chinese))
- [10] 郑 敏, 熊铁华, 梁框果. 基于失效模式的输电塔优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(5): 1672-1679. (ZHENG Min, XIONG Tie-hua, LIANG Shu-guo. Optimum designs for transmission line towers based on failure modes [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, **45**(5): 1672-1679. (in Chinese))
- [11] 徐 震, 王文明, 林清海, 等. 输电塔-线体系简化模型地震作用下的连续性倒塌分析[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(2): 304-309. (XU Zhen, WANG Wen-ming, LIN Qing-hai, et al. Progressive collapse analysis of a simplified model for transmission tower-line coupled system under seismic action [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, **37**(2): 304-309. (in Chinese))
- [12] Dhakal R P, Maekawa K. Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling [J]. *Engineering Structures*, 2002, **24**(11): 1383-1396.
- [13] 李秀金. 基于 OpenSees 的输电塔架结构抗震性能研究[D]. 武汉理工大学, 2014. (LI Xiu-jin. Study on the Seismic Performance of Transmission Tower Structure Based on OpenSees [D]. Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [14] GB50135-2019. 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (GB50135-2019. Code for the Design of High-Rising Structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2019. (in Chinese))
- [15] GB50009-2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (GB50009-2012. Load Code for the Design of Building Structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [16] 董 黛, 侯建国, 肖 龙, 等. 输电杆塔结构体系主要失效模式识别的计算程序研发[J]. 工程力学, 2013, **30**(8): 180-185, 198. (DONG Dai, HOU Jian-guo, XIAO Long, et al. Development of calculation program for identifying main failure modes of transmission tower system [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(8): 180-185, 198. (in Chinese))
- [17] 于晓辉, 吕大刚. 考虑结构不确定性的地震倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2012, **33**(10): 8-14. (YU Xiao-hui, LÜ Da-gang. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, **33**(10): 8-14. (in Chinese))
- [18] 吕大刚, 于晓辉, 陈志恒. 钢筋混凝土框架结构侧向倒塌地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, **43**(6): 1-5. (LÜ Da-gang, YU Xiao-hui, CHEN Zhi-heng. Lateral seismic collapse fragility analysis of RC frame structures [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, **43**(6): 1-5. (in Chinese))
- [19] 于晓辉, 吕大刚, 郑浩琴. 基于结构典型失效模式的地震侧向倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2014, **35**(8): 8-14. (YU Xiao-hui, LÜ Da-gang, ZHENG Hao-qin. Seismic sideway collapse fragility analysis based on structural typical failure modes [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, **35**(8): 8-14. (in Chinese))
- [20] FEMA. FEMA-350 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings [S]. 2000.
- [21] 徐铭阳, 王 丛, 董 尧, 等. 极罕遇地震作用下建筑结构一致风险抗倒塌设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, **43**(7): 253-263. (XU Ming-yang, WANG Cong, DONG Yao, et al. Study on uniform collapse risk design methods for building structures under very rare earthquakes: Taking RC frame-shear-wall structures as case study [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, **43**(7): 253-263. (in Chinese))
- [22] 吕大刚, 周 洲, 王 丛, 等. 考虑巨震的四级地震设

防水平一致风险导向定义与决策分析[J]. 土木工程学报, 2018, **51** (11): 41-52. (LÜ Da-gang, ZHOU Zhou, WANG Cong, et al. Uniform risk-targeted definitions and decision-making of four seismic design levels considering very rare earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, **51** (11): 41-52. (in Chinese))

[23] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

[24] GB18306-2015. 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (GB18306-2015. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015. (in Chinese))

[25] 施 炜, 叶列平, 陆新征, 等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学, 2011, **28** (3): 41-48, 68. (SHI Wei, YE Lie-ping, LU Xin-zheng, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28** (3): 41-48, 68. (in Chinese))

[26] 安 宁. RC 框架结构抗震可恢复性与一致倒塌概率 [D]. 大连理工大学, 2016. (AN Ning. Seismic recoverability and uniform Collapse Probability of RC Frame Structures [D]. Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese))

[27] FEMA. FEMA-695. Quantification of building seismic performance factors [S]. Washington, 2008.

Anti-collapse capacity assessment of owl type transmission towers
based on global seismic fragility analysis

SONG Peng-yan^{*1,2}, ZHAO Yang-kang^{1,2}, YANG Bao-wei^{1,2}

(1. School of College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China;
2. Technology Innovation Center for Testing and Evaluation in Civil Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)

Abstract: As a main component of transmission lines, the transmission tower structure is sensitive to seismic excitations. This study examines the seismic collapse resistance for owl-type transmission tower structures that were commonly used for China’s transmission lines. To do this, three line-type towers with different heights that were included in a specific actual single circuit were used as study cases. Based on OpenSees platform, a three-dimensional finite element model of the transmission tower structure was established. Four collapse limit states were determined according to different criteria. Twenty far-field ground motion records were selected as earthquake inputs. The incremental dynamic analysis (IDA) method was used to obtain the collapse points of the transmission tower structure using the considered four limit states, and the potential failure of bars was found. In a further step, the collapse fragility curves and the collapse margin ratios conditioned on different design earthquake levels were evaluated for the transmission tower structure. The results show that the seismic damage of the owl transmission tower is mainly concentrated in the tower head position. The seismic collapse resistance of the owl transmission tower structure decreases with the increase of height. Moreover, the owl transmission tower has a certain risk of collapse under the effect of strong earthquakes.

Key words: owl type transmission tower structure; collapse limit state; potential failure of bars; anti-collapse capacity; collapse fragility

引用本文/Cite this paper:
宋鹏彦, 赵仰康, 杨保卫. 基于整体易损性的猫头型输电塔抗倒塌能力分析[J]. 计算力学学报, 2023, **40** (5): 710-717.
SONG Peng-yan, ZHAO Yang-kang, YANG Bao-wei. Anti-collapse capacity assessment of owl type transmission towers based on global seismic fragility analysis [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40** (5): 710-717.