

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221209001

钢管混凝土输电塔地震易损性研究*

陈保健^{1,2}, 杜轲^{1,2}, 王飞³

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理
部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 北京市住房和城乡建设执法总队, 北京 100084)

摘要: 钢管混凝土输电塔, 由于混凝土与钢管相互作用, 使得其地震易损性不同于普通混凝土输电塔。为了对比研究它们的地震易损性区别, 从材料本构模型层面考虑钢管与核心混凝土的相互作用, 使用有限元软件 OpenSees 建立钢管混凝土输电塔模型, 对其进行结构响应分析, 并进一步采用增量动力分析方法绘制输电塔在多遇、设防、罕遇和极罕遇地震时的易损性曲线, 定量分析出地震的第一周期谱加速度对于钢管混凝土输电塔失效概率的影响, 同时与普通输电塔的地震易损性结果进行对比。研究表明: 钢管混凝土输电塔在多遇、设防、罕遇、极罕遇地震作用下均不易发生严重破坏和倒塌, 钢管混凝土输电塔出现倒塌时的 $S_a(T_1)$ 多位于 $1.0g \sim 1.4g$; 随着地震强度的增加, 钢管混凝土输电塔相较于普通输电塔的抗震性能更差。

关键词: 钢管混凝土输电塔; IDA; 易损性分析; OpenSees; 抗震性能; 结构响应分析

中图分类号: TU392.3; TU312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0381-08

Study on Seismic Vulnerability of Concrete-Filled Steel Tube Transmission Towers

CHEN Baojian^{1,2}, DU Ke^{1,2}, WANG Fei³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China;

3. Law Enforcement Team of Beijing Municipal Commission for Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100084, China)

Abstract: The interaction between concrete and steel tubes in concrete-filled steel tube (CFST) transmission towers makes their seismic vulnerability different from that in ordinary concrete transmission towers. To compare and study these differences, the article examined the interaction between steel tubes and core concrete from a material constitutive model perspective. It used finite element software OpenSees to establish a model for the CFST transmission tower and analyzed its structural response. Incremental dynamic analysis was then applied to delineate vulnerability curves under various conditions, including frequent, design basis, rare, and extremely rare earthquakes. Furthermore, the quantitative influence of the first cycle spectral acceleration on the failure probability of CFST transmission towers was assessed. The results of seismic vulnerability were compared with those of ordinary trans-

* 收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878631)、黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E098)资助

作者简介: 陈保健(1998—), 女, 硕士研究生。主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: Chenbaojian1202@163.com

通讯作者: 杜轲(1985—), 男, 研究员, 硕导。主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: duke@iem.ac.cn

mission towers. Findings indicated that CFST transmission towers were less vulnerable to severe damage or collapse under the actions of frequent, design basis, rare, and extremely rare earthquakes. The first cycle spectral accelerations were mostly between $1.0g \sim 1.4g$. With the increase in earthquake intensity, the seismic performance of CFST transmission towers became worse than that of ordinary transmission towers.

Keywords: concrete-filled steel tube transmission tower; incremental dynamic analysis; vulnerability analysis; opensees; seismic performance; structural response analysis

0 引言

近年来,我国发生了很多由地震造成的输电塔结构破坏乃至倒塌的事件。比如2008年汶川地震中^[1],地震引起的山体滑坡、泥石流等造成了多座输电塔倾斜、构件损坏;2013年芦山地震中^[2],地震导致输电塔避雷针断裂,杆塔构件损坏以及雅安电网的破坏;2017年九寨沟地震中^[3],地震引起的滑坡、滚石导致输电塔倒塌,九寨沟全站失电。由于输电塔破坏而导致的事故不断增加,输电塔的抗震研究也引起更多的关注。早期的输电塔以钢筋混凝土材料为主,但由于钢筋混凝土材料的限制,塔的质量过大,高度有限。随着对承载力和跨度的要求越来越高,输电塔开始逐渐向角钢塔、钢管塔、以及钢混结构输电塔方向发展。其中角钢塔^[4-5]具有结构承载力强、施工成本低的优势,但整体刚度偏小,抗震能力较弱;钢混结构输电塔具有整体稳定性高的优点,但成本较高,经济性差;而在钢管混凝土输电塔中,混凝土与钢管相互作用,既可以有效防止钢管发生屈曲,又可以有效提高混凝土的抗压能力,故钢管混凝土整体的承载力也得到进一步提高^[6],同时由于具有延性好,抗风性能优越的特点,钢管混凝土更适合用于大跨、高耸的输电塔结构。

输电塔的破坏不仅会导致直接经济损失,也造成了很多间接的社会影响,为此,对输电塔进行抗震分析是必要的。易损性分析^[7]可以从概率的意义上定量地刻画结构的抗震性能,从宏观的角度描述地震动强度与结构破坏程度之间的关系,因此本文将利用地震易损性分析的方法对钢管混凝土输电塔进行抗震性能分析。

地震易损性分析方法主要分为经验法和理论分析法^[8],经验法^[9]通过统计大量震害资料,归纳出地震动参数与地震震级的关系,但存在资料不足,适用性局限的问题;理论分析法^[10]通过计算分析得

出地震动参数与地震震级的关系,从而判断地震灾害,实用性更强,因此被广泛使用。目前,国内学者使用理论分析法对输电塔进行了大量研究,谢丽宇等^[11]和李宏男等^[12]采用非线性屈曲分析及动力响应分析方法对输电塔结构抗震性能进行了研究;李荣帅^[13]和欧进萍等^[14]使用能力谱法对输电塔结构的抗震性能进行了研究;张伟等^[15]、和王弘洋^[16]采用增量动力分析方法对输电塔的抗震性能进行了分析;A.H.S.Ang等^[17]和I.Vanz^[18]也使用理论分析法对输电塔抗震性能进行了大量研究。上述研究对普通输电塔的易损性分析具有良好的参考意义,但钢管混凝土结构由于存在混凝土与钢管的相互作用,使得以上研究成果不完全适用于钢管混凝土输电塔,因此本文将从材料本构模型层面考虑钢管与核心混凝土相互作用,对钢管混凝土输电塔的地震易损性进行研究,并将研究结果与普通输电塔的地震易损性进行对比。

1 钢管混凝土输电塔模型

1.1 材料本构模型

在钢管混凝土构件中,钢管对混凝土的约束作用使得混凝土的强度提高,韧性和塑性性能得到改善,而混凝土的存在又可以阻止或延缓钢管的屈曲,因此钢管混凝土构件的性能不仅取决于钢管和混凝土的材料性质,也取决于两者几何参数以及物理参数如何“匹配”。韩林海等^[19]基于对钢管与核心混凝土相互作用的考虑,提出了“约束效应系数”概念,并以约束效应系数为基本参数提出了适用于钢管混凝土的核心混凝土受压应力-应变关系模型。

本文针对圆型钢管混凝土使用了核心混凝土受压应力(σ)-应变(ϵ)关系模型^[19]

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ x / [\beta_1(x-1)^2 + x], & (\xi < 1.12) \quad (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x = \epsilon/\epsilon_0, y = \sigma/\sigma_0, \sigma_0$ 为峰值应力, ϵ_0 为与 σ_0 对应的应变; q, β_1 和 β_2 为中间变量。公式的适用范围是: Q235~Q460 钢; C30~C80 混凝土; 对于圆钢管混凝土, $\alpha = 0.06 \sim 0.2, \xi = 0.6 \sim 4.0$; 图 1 所示为考虑约束效应和不考虑约束效应下核心混凝土受压应力—应变关系模型的示意图, 其中 σ_{02}, σ_{01} 分别对应考虑约束和不考虑约束情况下的峰值应力, ϵ_{02} 和 ϵ_{01} 分别为对应的应变, 如图 1 所示, 考虑约束效应后, 核心混凝土的峰值应力 σ_{02} 与之对应应变 ϵ_{02} 均增大, 应变软化的降低幅度也增大, 混凝土的强度及延性提高。

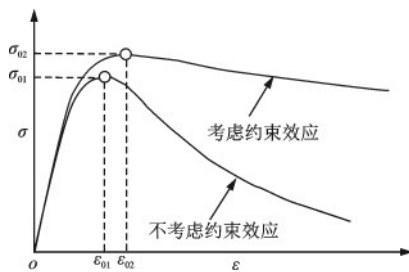


图 1 不同约束情况下核心混凝土受压应力—应变关系示意图
Fig. 1 Diagram of compressive stress-strain relationship of core concrete under different confinement conditions

1.2 钢管混凝土输电塔模型

以浙江龟山输电塔为原型, 输电塔呼高为 210 m、全高为 248 m, 采用导线垂直排列的三层横担塔头型式, 塔身的截面形状为正方形, 根开为 44.3 m。根据实际经验, 选取混凝土的灌注高度为 138 m。采用 OpenSees 建模, 模型共计 448 个节点, 1 360 个单元, 单元类型选用非线性梁柱单元, 模型采用固定方式约束, 截面类型选用钢管截面, 阻尼采用瑞利阻尼, 边界约束方程采用转换约束。有限元模型如图 2 所示。钢管混凝土构件的截面纤维示意如图 3 所示。

经过模态分析可得输电塔前五阶周期和振型见表 1。

2 结构易损性分析

2.1 地震动选取与调幅

输电塔所在地区抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 $0.20g$, 场地类别为 II 类, 选择设计地震分组为第二组的规范设计谱作为目标谱, 从 PEER 数据库中, 在结构主要周期段匹配目标反应谱筛选出一系列地震动, 并根据规范

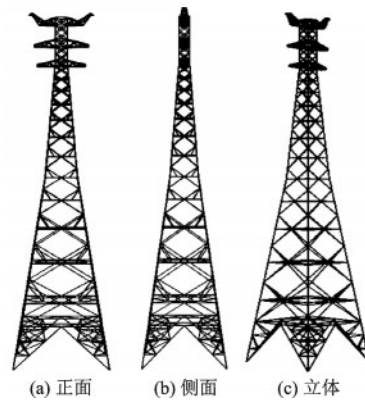


图 2 钢管混凝土输电塔的三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model for concrete-filled steel tube transmission towers

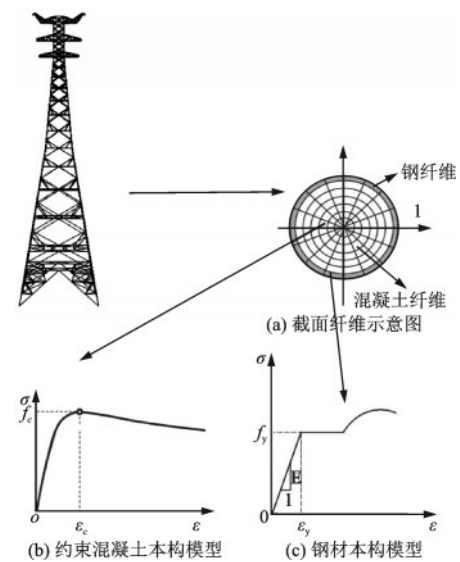


图 3 钢管混凝土构件截面纤维示意图

Fig. 3 Diagram of cross-section fiber of concrete-filled steel tube members

表 1 钢管混凝土输电塔前五阶周期

Table 1 First five cycles of concrete-filled steel tube transmission towers

阶数	周期/s	模态
1	1.280	横向弯曲
2	1.279	纵向弯曲
3	0.787	横向弯曲
4	0.784	纵向弯曲
5	0.609	扭转

ATC-63^[20] 要求, 最终确定 11 条地震动记录用于分析使用, 所选地震动记录信息见表 2。使用 $S_a(T_1)$ 调幅方法^[21] 调幅, 调幅结果如图 4 所示。分别将调幅后的地震动反应谱均值与目标谱进行对比, 如图 5 所示。

表2 选用地震动记录信息

Table 2 Information of selected seismic records

编号	台站/记录时间/地震名称	PGA/g
EQ1	San Fernando, 2/9/1971, Santa Felita Dam (Outlet)	0.155
EQ2	Loma Prieta, 10/18/1989, Anderson Dam (L Abut)	0.064
EQ3	Cape Mendocino, 4/25/1992, Fortuna - Fortuna Blvd	0.117
EQ4	Cape Mendocino, 4/25/1992, Loleta Fire Station	0.265
EQ5	Landers, 6/28/1992, North Palm Springs Fire Sta #36	0.139
EQ6	Chuetsu-oki, 7/16/2007, Joetsu Ogataku	0.188
EQ7	Chuetsu-oki, 7/16/2007, Sawa Mizuguti Tokamachi	0.125
EQ8	Iwate, 6/13/2008, Tamati Ono	0.245
EQ9	Iwate, 6/13/2008, Kami Miyagi Miyazaki City	0.156
EQ10	Manjil Iran, 6/20/1990, Abbar	0.515
EQ11	Imperial Valley-06, 10/15/1979, Cerro Prieto	0.168

2.2 确定地震动需求参数

地震动需求参数是工程抗震设计的依据,不同工程对工程场地地震安全性评价的深度以及提供参数的要求不同,这取决于工程的类型,工程的安全性,危险性以及社会影响等因素。目前常见的地震动需求参数中,节间位移角和峰值加速度可以很好地反映出整个结构以及结构中不同构件的损伤情况,故本文选取节间位移角和峰值加速度作为地震动需求参数^[22]。将地震动分别调幅至多遇地震、设防地震、罕遇地震、极罕遇地震四个强度等级,使用调幅后的地震动对输电塔进行弹塑性时程分析。

以节间位移角作为损伤目标时,国内学者高小旺等^[23]、于晓辉等^[24]对于钢管混凝土结构提出了较为详细的节间位移角限值划分。本文参照于晓辉划分的节间位移角限值,节间位移角在1/500之内,结构基本完好;节间位移角在1/500~1/250,结构发生轻微破坏;节间位移角为1/250~1/125,结构发生中等破坏,节间位移角为1/125~1/50,结构发生严重破坏;节间位移角大于1/50时,结构发生倒塌。

2.3 结构响应分析

2.3.1 节间位移角结果分析

将调幅至多遇地震、设防地震、罕遇地震、极罕遇地震四个强度等级的11条地震动分别输入OpenSees中对输电塔进行弹塑性时程分析^[25],得到的节间位移角均值结果如图6所示。

如图6所示,可以发现:钢管混凝土输电塔在多遇地震、设防地震、罕遇地震以及极罕遇地震下的最大节间位移角均未超过倒塌时的节间位移角限值,其中钢管混凝土输电塔在多遇地震和设防地震的作用下基本完好,不会发生破坏;在罕遇地震下发生轻微破坏;在极罕遇地震下发生中等破坏。

2.3.2 峰值加速度结果分析

将调幅至多遇地震、设防地震、罕遇地震、极罕遇地震四个强度等级的11条地震动分别输入OpenSees中对输电塔进行弹塑性时程分析^[25],得到的峰值加速度均值分析结果如图7所示。

从图7所示结果可以看出:钢管混凝土输电塔的峰值加速度响应从塔底到塔顶逐渐增大,塔顶峰值加速度最大;随着地震强度的增加,钢管混凝土输电塔塔顶的峰值加速度也越来越大;钢管混凝土输电塔在多遇地震、设防地震、罕遇地震以及极罕

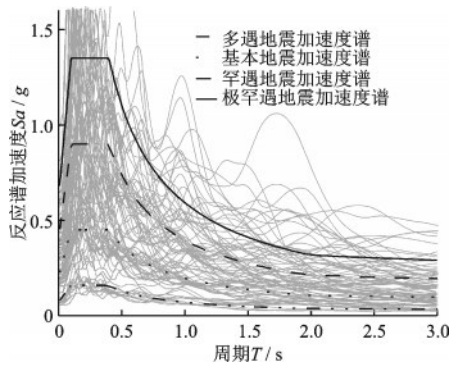


图4 四个强度等级的加速度反应谱

Fig.4 Acceleration response spectra for four intensity levels

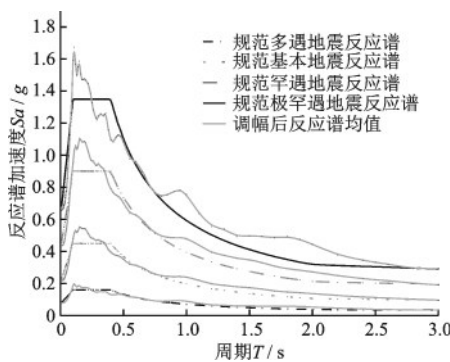
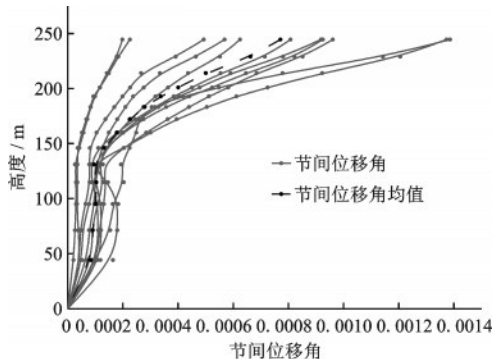
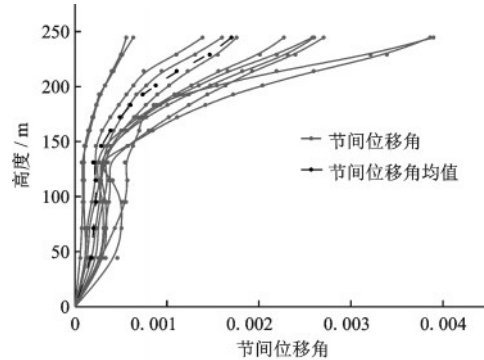


图5 调幅后的平均加速度反应谱曲线

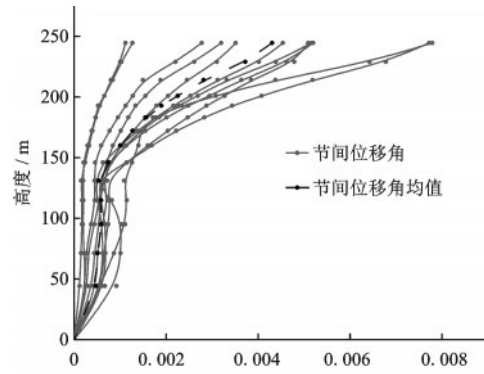
Fig.5 Average acceleration response spectrum curves after amplitude modulation



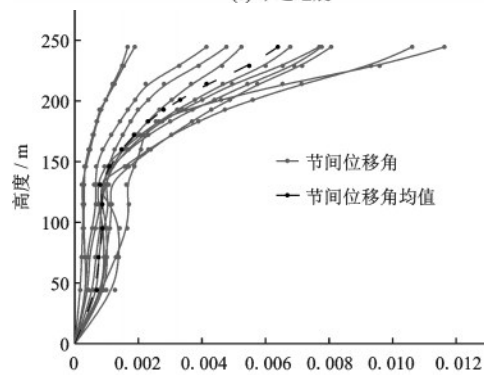
(a) 多遇地震



(b) 设防地震



(c) 罕遇地震

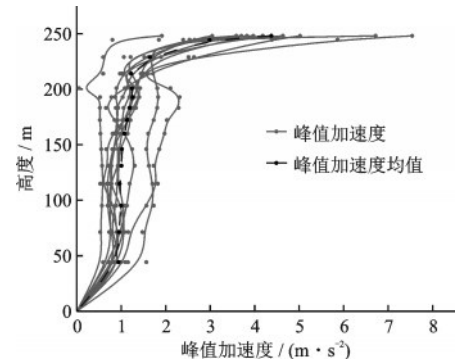


(d) 极罕遇地震

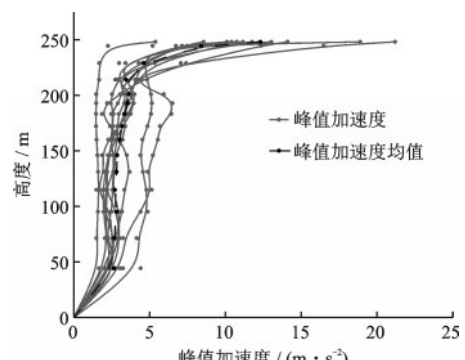
图6 地震作用下节间位移角的分析结果

Fig.6 Analysis results of internode displacement angles under earthquakes

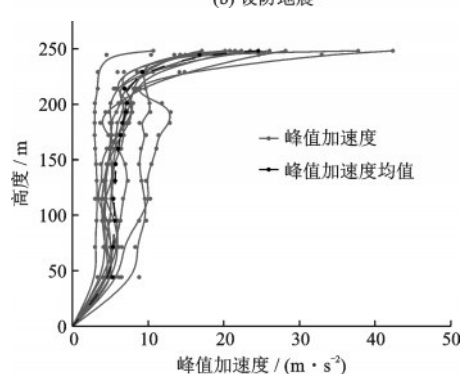
遇地震下的塔顶峰值地震加速度均值分别为4.5、12、25、35 m/s^2 。



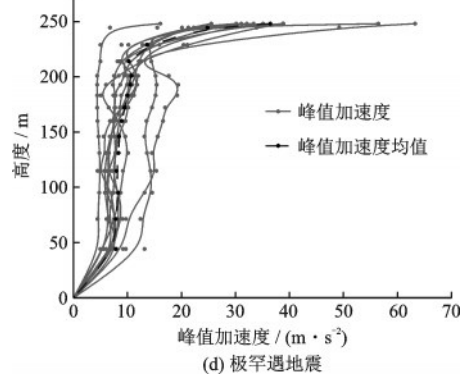
(a) 多遇地震



(b) 设防地震



(c) 罕遇地震



(d) 极罕遇地震

图7 地震作用下的峰值加速度分析结果

Fig.7 Analysis results of peak accelerations under earthquakes

2.4 易损性分析

舒兴平等^[26]基于增量动力分析方法进行了结

构易损性的研究,研究发现使用增量动力分析方法进行易损性研究可以很好的表现结构的抗震性能,且该方法分析结果精确,通过调幅可以考虑非常小和非常大的地震动强度以及不同地震动强度下结构反应标准差的变化,同时为预测地震破坏提供科学依据,因此本文使用增量动力分析方法进行结构的易损性分析。

根据 N.Shome^[27]的研究可知,地震需求参数 EDP 的中位值 m_D 与地震动参数 IM 之间服从幂指数关系:

$$m_D = c(IM)^b \quad (2)$$

式中, c 、 b 为回归系数,对等式两边取对数,可得对数线性化概率地震需求模型为:

$$\ln(m_D) = \ln(c) + b \ln(IM) \quad (3)$$

以地震的第一周期加速度 $Sa(T_1)$ 和对应的节间位移角作为样本进行回归分析,即可求得回归系数 c 、 b 的值。

特高压钢管混凝土输电塔易损性是指在不同参数的地震作用下,特高压钢管混凝土输电塔达到各级损伤破坏的条件概率,其公式为:

$$F_R(x) = P[EDP > d|IM] = \Phi\left[\frac{\ln m_D - \ln m_C}{\beta}\right] \quad (4)$$

式中, m_C 为结构抗震能力均值; β 为结构地震易损性函数的对数标准差。

参考周强等^[28]关于地震易损性研究方法可知,本文根据规范 ATC-63^[20]相关要求,选取 11 条地震响应进行分布参数的估计是可信的。因此根据增量动力分析得到的数据进行概率统计分析,得到条件累积概率密度函数(CDF),进一步进行拟合求解,即可求得基本完好时: $m_C = 0.128g$; $\beta = 0.468$, 发生轻微破坏: $m_C = 0.218g$; $\beta = 0.491$, 发生中等破坏: $m_C = 0.466g$; $\beta = 0.326$, 发生严重破坏(倒塌): $m_C = 1.1g$; $\beta = 0.25$, 从而得到特高压钢管混凝土输电塔的易损性曲线,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,随着 $Sa(T_1)$ 的增大,所有损伤等级的曲线越来越陡,钢管混凝土输电塔发生破坏的概率也越来越高。当 $Sa(T_1)$ 为 $0g \sim 0.6g$ 时,输电塔未发生倒塌,当 $Sa(T_1)$ 为 $0.6g \sim 1.6g$ 时,倒塌概率越来越高,倒塌概率为 50% 时, $Sa(T_1) = 1.1g$ 。

由表 1 知钢管混凝土输电塔的地震第一周期为 1.28 s,由图 5 可知,该周期对应的多遇、设防、罕遇、极罕遇四种地震动的谱加速度分别为 $0.052g$ 、 $0.140g$ 、

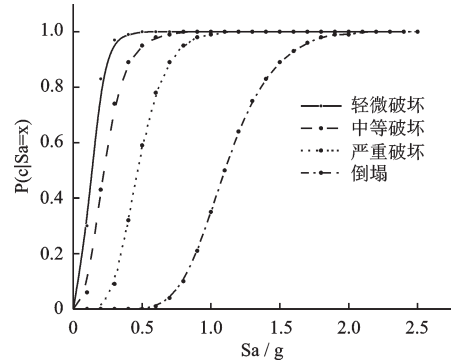


图 8 钢管混凝土输电塔的易损性曲线

Fig.8 Vulnerability curves of concrete-filled steel tube transmission towers

$0.281g$ 、 $0.420g$ 。潘海洋^[29]借鉴建筑结构层间位移角概念,同样选取第一周期谱加速度 $Sa(T_1)$ 作为地震动参数,采用增量动力分析方法建立普通输电塔的概率地震需求模型,并对普通输电塔进行了地震易损性分析,其中普通输电塔的损伤状态划分标准与本文钢管混凝土输电塔的损伤状态划分标准相同。将普通输电塔与钢管混凝土输电塔在不同水平地震下的地震易损性矩阵进行对比,结果见表 3。

表 3 普通输电塔与钢管混凝土输电塔在不同水平地震下地震易损性矩阵

Table 3 Seismic vulnerability matrix of ordinary transmission towers and concrete-filled steel tube transmission towers under earthquakes of different intensity levels 单位: %

地震水准	多遇	设防	罕遇	极罕遇	
$Sa(T_1)/g$	0.052g	0.140g	0.281g	0.420g	
普通输电塔	好	100	100	95	88
	轻	-	-	5	10
	中	-	-	-	2
	严	-	-	-	-
	毁	-	-	-	-
钢管混凝土输电塔	好	90	60	-	-
	轻	10	30	15	5
	中	-	10	75	65
	严	-	-	10	30
	毁	-	-	-	-

(1)多遇地震动作用下普通输电塔处于弹性状态,结构基本完好,而钢管混凝土输电塔超越基本完好极限状态概率为 90%,轻微破坏的概率为 10%。

(2)设防地震动作用下普通输电塔处于弹性状

态,结构基本完好,而钢管混凝土输电塔超越基本完好极限状态概率为60%,轻微破坏的概率为30%,中等破坏的概率约为10%。

(3)罕遇地震动作用下普通输电塔超越基本完好极限状态概率为95%,轻微破坏的概率为5%,而钢管混凝土输电塔轻微破坏、中等破坏、严重破坏的概率约为15%、75%、10%。

(4)极罕遇地震动作用下普通输电塔超越基本完好的概率为88%,轻微破坏的概率为10%,中等破坏的概率约为2%,而钢管混凝土输电塔轻微破坏、中等破坏、严重破坏的概率分别为5%、65%、30%。

故在具有相同谱加速度和相同损伤状态判定标准的情况下,钢管混凝土输电塔的动力响应要大于普通输电塔,更容易发生破坏。

3 结 论

目前,国内外对于钢管混凝土输电塔的抗震性能研究较少,而钢管混凝土结构中混凝土与钢管相互作用使得普通输电塔的研究结果不一定适用于钢管混凝土输电塔,因此本文主要对钢管混凝土输电塔进行易损性分析,研究钢管混凝土输电塔在地震作用下的超越概率以及抗倒塌能力。并与普通输电塔的地震易损性结果进行对比。可得到以下结论:

(1)随着地震震级的增加,普通输电塔和钢管混凝土输电塔均逐渐由基本完好状态平缓进入震害状态,且各极限状态的超越概率均逐渐增大。

(2)在具有相同谱加速度和损伤判定标准的情况下,钢管混凝土输电塔的动力响应要大于普通输电塔,因此更容易发生破坏。但实际情况下钢管混凝土输电塔的损伤指标与普通输电塔的损伤指标可能并不相同,因此钢管混凝土输电塔与普通输电塔地震易损性结果的对比具有一定的局限性,有待进一步研究探讨。

(3)普通输电塔与钢管混凝土输电塔在多遇、设防、罕遇、极罕遇地震下均不易发生严重破坏和倒塌,因此具备良好的抗震性能。

参考文献:

[1] 张星海,吴广宁,蒋伟,等.汶川特大地震对四川电网的影响[J].现代电力,2009,26(4):4-9.

Zhang X H, Wu G N, Jiang W, et al. Effects of Wenchuan Earthquake on Sichuan Grid[J]. Modern Electric Power, 2009,26(4):4-9. (in Chinese)

[2] 尤红兵,赵凤新.芦山7.0级地震及电力设施破坏原因分析[J].电力建设,2013,34(8):100-104.
You H B, Zhao F X. M7.0 Earthquake in Lushan and damage cause analysis of power facilities [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 100-104. (in Chinese)

[3] 韩晓言,刘洋,范少君.九寨沟M_{7.0}地震四川电网受损分析及处置措施[J].四川电力技术,2018,41(2):68-71.
Han X Y, Liu Y, Fan S J. Damage analysis of Sichuan Power Grid in 7.0 magnitude earthquake of Jiuzhaigou and processing measures [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018,41(2): 68-71. (in Chinese)

[4] 沈国辉,余杭聪,余亮.大跨越输电塔的发展现状[J].施工技术,2021,50(13):103-107.
Shen G H, Yu H C, Yu L. Current development of long span transmission towers [J]. Construction Technology, 2021,50(13): 103-107. (in Chinese)

[5] 盛金马,韩承永,张壮,等.110 kV双回路窄基角钢塔结构抗震分析[J].安徽建筑大学学报,2019,27(1):22-27.
Sheng J M, Han C Y, Zhang Z, et al. Anti-seismic analysis of narrow-base angle steel tower with 110 kV double-loop [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2019,27(1): 22-27. (in Chinese)

[6] 韩林海,陶忠,刘威.钢管混凝土结构——理论与实践[J].福州大学学报(自然科学版),2001,29(6):24-34.
Han L H, Tao Z, Liu W. Concrete filled steel tubular structures—theory and practice [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2001, 29(6): 24-34. (in Chinese)

[7] 于晓辉,吕大刚,王光远.土木工程结构地震易损性分析的研究进展[C]//大连:第二届结构工程新进展国际会议论坛论文集,2008:772-783.
YU Xiaohui, LV Dagang, Wang Guangyuan. Seismic fragility analysis of civil Engineering structures [C]//Dalian: Proceedings of the Second International Forum on Advances in Structural Engineering, 2008:772-783. (in Chinese)

[8] 周奎,李伟,余金鑫.地震易损性分析方法研究综述[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):106-113.
Zhou K, Li W, Yu J X. Review of seismic fragility analysis methods [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011,31(1): 106-113. (in Chinese)

[9] 唐也茜,朱胜隆.建筑结构地震易损性分析方法研究

- 进展综述[J]. 大众标准化, 2019, 11(15): 70-71.
- Tang Y Q, Zhu S L. Review on research progress of seismic vulnerability analysis methods for building structures [J]. Popular Standardization, 2019, 11 (15) : 70-71. (in Chinese)
- [10] 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, 2018.
- Zhou Q. Performance-based seismic fragility analysis and design of transmission tower [D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese)
- [11] 谢丽宇, 唐钰, 谢强, 等. 基于性能的输电塔地震易损性分析[J]. 特种结构, 2014, 31(1): 104-108, 68.
- Xie L Y, Tang Y, Xie Q, et al. Seismic vulnerability analysis of transmission tower based on performance [J]. Special Structures, 2014, 31(1): 104-108, 68. (in Chinese)
- [12] 李宏男, 胡大柱, 黄连状. 地震作用下输电塔体系塑性极限状态分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 192-199.
- Li H N, Hu D Z, Huang L Z. Plastic limit analysis of the transmission tower system subjected to earthquake action [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (24) : 192-199. (in Chinese)
- [13] 李荣帅. 高压输电塔优化及抗震性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- Li R S. Study on optimization and seismic performance of high voltage transmission tower [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021. (in Chinese)
- [14] 欧进萍, 侯钢领, 吴斌. 概率 Pushover 分析方法及其在结构体系抗震可靠度评估中的应用[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 81-86.
- Ou J P, Hou G L, Wu B. Random pushover analysis method and its application in earthquake-resistant reliability evaluation of structural systems [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6): 81-86. (in Chinese)
- [15] 张伟, 周强, 唐可人. 基于位移的输电塔地震易损性分析[J]. 钢结构, 2016, 31(12): 47-52.
- Zhang W, Zhou Q, Tang K R. Displacement-based seismic fragility analysis method for power transmission tower [J]. Steel Construction, 2016, 31 (12) : 47-52. (in Chinese)
- [16] 王弘洋. 动力荷载作用下输电塔线体系易损性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- Wang H Y. Study on the vulnerability of transmission tower line system under dynamic load [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] Ang A H S, Pires J A, Villaverde R, et al. A model for the seismic reliability assessment of electric power transmission systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 51(1): 7-12.
- [18] Vanz I. Seismic reliability of electric power networks: methodology and application [J]. Structural Safety, 1996, 18(4): 311-327.
- [19] 韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用[J]. 科学通报, 2020, 65(28/29): 3173-3184.
- Han L H, Yang Y F, Yang H, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(28/29): 3173-3184. (in Chinese)
- [20] Jon A H. Quantification of building seismic performance factors [R]. Redwood City: ATC, 2009.
- [21] 曹芳, 孙晓华. 时程分析地震动输入选取原则分析[J]. 科学技术创新, 2014, 18(20): 105-107.
- Cao F, Sun X H. Time history analysis and the analysis of ground motion input selection principle [J]. Scientific and Technological Innovation, 2014, 18(20): 105-107. (in Chinese)
- [22] 刘洪波, 孙伟轩, 张玉鑫. 框架结构的输入地震动记录调幅方法试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 80-87.
- Liu H B, Sun W X, Zhang Y X. Experimental study on the scaling method for ground motions for frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 80-87. (in Chinese)
- [23] 高小旺, 陈德彬, 秦权. 高层钢结构抗震设计的位移限值[J]. 工业建筑, 1992, 29(12): 16-20.
- Gao X W, Chen D B, Qin Q. Ultimate displacement of high-rise steel structures for seismic design [J]. Industrial Construction, 1992, 29(12): 16-20. (in Chinese)
- [24] 于晓辉, 吕大刚, 贾明明. 基于 Park-Ang 损伤指数的改进概率地震需求模型 [C]//兰州: 第 23 届全国结构工程学术会议论文集, 2014: 244-248.
- YU Xiaohui, LV Dagang, JIA Mingming. An improved probabilistic seismic demand model based on park-ang damage index [C]//Lanzhou: Proc. 23th National Conference on Structural Engineering, 2014: 244-248. (in Chinese)
- [25] 武世媛. 基于 OpenSEES 对钢筋混凝土侧煤仓结构弹塑性地震反应分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- Wu S Y. Elastic-plastic earthquake response analysis of rc boiler-side bunker structures based on openses [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)

(下转第 425 页)