

城市轨道交通大跨度钢管混凝土柱车站地震易损性仿真分析

李诗尧^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//工程师)

摘要 为提升城市轨道交通车站的建筑功能,目前设计采用钢管混凝土柱且加大柱距是常见的一种手段。为此,需要对大跨度钢管混凝土柱车站的地震易损性进行研究,并对比分析钢管混凝土柱与传统钢筋混凝土柱的受力特点及抗震性能。以我国南方某采用钢管混凝土柱的城市轨道交通车站为原型,采用 Midas GTS NX 软件建立三维计算模型,对其地震易损性进行研究。采用静力推覆法确定车站结构的损伤指标;选择 10 条天然地震波,对车站结构进行增量动力分析,得到车站在地震作用下的相对位移角;将增量动力分析的结果进行对数正态分布拟合,得到车站的地震易损性曲线。结果表明:地震峰值加速度为 $0.8g$ (g 为重力加速度)时,钢管混凝土柱车站结构发生轻微破坏的概率为 83.46%,发生严重破坏的概率为 15.21%,发生毁坏的概率为 4.26%。相较于常规混凝土框架结构车站,钢管混凝土柱车站的抗震性能更好。

关键词 城市轨道交通;车站;大跨度钢管混凝土柱;地震易损性

中图分类号 U231.4; TU311

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.006

Seismic Vulnerability Simulation Analysis of Urban Rail Transit Large-span Concrete-filled Steel Tube Column Station

LI Shiyao

Abstract To improve the functionality of urban rail transit station design, the use of CSFT (concrete-filled steel tube) column with increased column spacing is a common approach. The seismic vulnerability of a large-span CSFT column station needs to be studied, and the stress characteristics and seismic performance of CSFT columns need to be compared with conventional reinforced concrete columns. Taking an urban rail transit station with CFST column in southern China as prototype, a 3D calculation model is established using Midas GTS NX software, and its seismic vulnerability is studied. The static pushover analysis method is used to determine the station structure damage indexes. 10 natural seismic waves are select-

ed, and IDA (incremental dynamic analysis) is performed to obtain the relative displacement angles of the station under various seismic actions. The results of the IDA are fitted to a logarithmic normal distribution to obtain the seismic vulnerability curve of the station. Results show that when the peak seismic acceleration is $0.8g$ (g as the gravitational acceleration), the probability of slight damage to the CFST station structure is 83.46%, the probability of severe damage is 15.21%, and the probability of collapse is 4.26%. Compared with a common concrete frame structure station, CFST column station demonstrates better seismic performance.

Key words urban rail transit; station; large-span concrete-filled steel tube column; seismic vulnerability; simulation analysis

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

随着城市轨道交通设计成熟化,其车站设计在满足经济与安全需求的前提下,应更多地致力于提升建筑功能,即空间更大、层高更高、视野更好、乘客舒适性更强。该需求在枢纽车站、中心车站、换乘车站等重点车站中更为迫切,同时对结构设计提出的挑战性也更高。

目前,常见的一种提升地铁车站建筑功能的手段为加大柱距,即在车站纵、横两个方向增加框架柱间距,从而使建筑空间布置更加自由,站厅及站台层视野更好。伴随着柱距增大,仅靠增大柱截面面积在大多数情况下已不能满足需求,这时便需要使用截面面积更小、承载能力更高的钢管混凝土柱。本文着眼于这类型车站的地震易损性进行研究,并将该类型车站与传统钢筋混凝土框架结构车站的抗震性能进行了对比。

1 工程背景

本文结合我国南方某城市轨道交通车站的实

际工程经验,对使用钢管混凝土柱的地铁车站的地震易损性进行研究。所选城市轨道交通车站为该市中心重点枢纽车站,共 4 条线路在该站进行换乘,同时兼具了城市轨道交通与国家铁路的互联功能。因而在设计之初,该车站便打破了常规车站柱距的限制,车站横向柱距达 13.5 m,纵向柱距达 12.0 m,以求提供更好的建筑使用功能。

为与城市轨道交通车站的大跨度进行匹配,结构设计中选择了 $\phi 1.2$ m 的钢管混凝土柱,并舍弃了常规车站纵梁单向受力体系,改为纵横梁双向受力体系,从而在保障安全的同时兼具经济性。

该车站为地下三层站,覆土厚度为 2.5 m,标准段宽度为 43.2 m,结构高度为 30.1 m。车站横剖面示意图如图 1 所示。

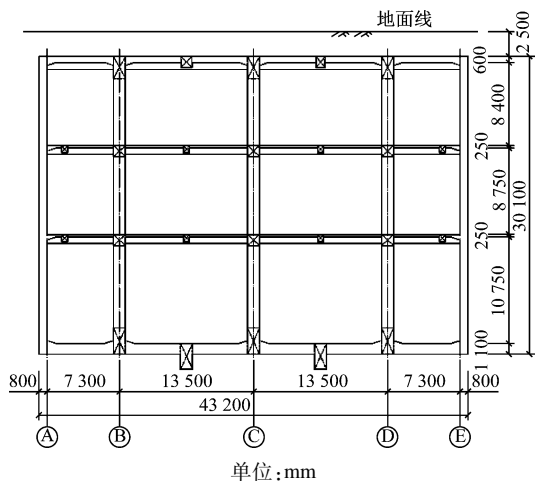


图 1 某城市轨道交通车站横剖面示意图

Fig. 1 Profile diagram of an urban rail transit station

本文以该车站为原型,使用 Midas GTS NX 软件建立三维模型,建模过程严格按照 GB/T 51336—2018《地下结构抗震设计标准》第 6.7 节及其相关规范规定进行。土体材料本构模型能够反映复杂往返加载条件下的应力-应变规律。根据实际地勘资料与室内试验数据标定模型参数,计算中考虑土体与结构接触面的力学行为。以三维模型为基础,对车站结构的地震易损性进行分析研究,从而对该非常规车站的抗震能力进行仿真检验。

2 结构易损性分析简介

所谓结构易损性曲线,即是在对结构进行一定数量的计算分析基础上,对结构在各水平地震作用下的性能给出合理的预测,对结构的抗震设计、加固和维修决策,以及震后经济损失和人员伤亡预

测等均具有重要的应用价值。易损性的研究主要分以下 3 个步骤:

1) 定义损伤指标:对结构损伤指标进行定义时,需要得到结构的屈服状态限值和极限状态限值。本文对车站结构模型进行静力推覆分析,在此过程中观察车站结构位移状态,绘制位移曲线,完成损伤指标定义^[1]。

2) 地震反应分析:要获得结构的地震易损性曲线,就必须获取结构在各地震强度下的反应情况。本文采取的方法是选取一定数量具备不同峰值加速度、不同作用持续时间、不同频率,以及不同时变振幅的地震动作为输入条件,对结构模型进行 IDA (增量动力分析),得到结构位移与地震强度的对应关系。

3) 易损性分析:结构在特定地震强度下,发生各个等级损伤的概率。大量研究成果均表明,结构的易损性曲线可假设为双参数对数正态分布曲线。结构在地震作用下产生各个等级损伤的概率值 P_i 可由式(1)计算,即结构易损性曲线可由式(1)来进行拟合^[2-3]。其中,结构自身性能 R_c 和结构在地震作用下的反应值 S_d 均服从对数正态分布。

$$P_i = \Phi \left[-\ln \left(\frac{R_c}{S_d} \right) / \sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2} \right] \quad (1)$$

式中:

β_c ——结构自身性能标准差;

β_d ——结构在地震作用下的反应值标准差;

$\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数。

3 车站结构损伤指标的确定

对结构易损性进行分析时,首先需定义结构的地震损伤指标。本文选择钢管混凝土柱车站顶板相对于底板的最大位移角 A_{RD} (即相对位移角)作为其损伤指标,即 A_{RD} 为在各个水平地震作用下,车站顶板相对于底板的最大位移与车站总高度 (30.1 m) 的比值。

将车站结构能够达到的 A_{RD} 的极限值采用 $A_{RD,ult}$ 表示,屈服位移角采用 $A_{RD,ye}$ 表示,0.5 倍的 $A_{RD,ye}$ 采用 $A_{RD,ud}$ 表示,即 $A_{RD,ud} = 0.5 A_{RD,ye}$ 。参考国内外其他学者研究成果及文献[3,7-8],本文最终选定的车站结构损伤指标定义如下:①基本完好—— $A_{RD} \leq A_{RD,ud}$;②轻微破坏—— $A_{RD,ud} \leq A_{RD} \leq A_{RD,ye}$;③严重破坏—— $A_{RD,ye} \leq A_{RD} \leq A_{RD,ult}$;④毁坏—— $A_{RD} \geq A_{RD,ult}$ 。

为确定车站结构的 $A_{RD, ye}$ 和 $A_{RD, ult}$, 对其进行静力推覆分析, 在分析过程中以倒三角形形式施加侧向荷载, 由此得到的车站结构基底剪力同相对位移与 A_{RD} 曲线, 如图 2 所示。

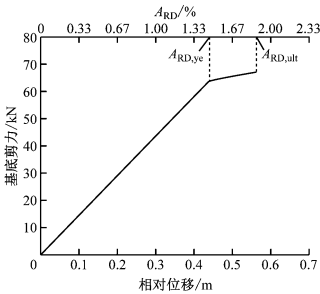


图 2 钢管混凝土柱车站结构基底剪力同相对位移与 A_{RD} 的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of CFST column station structural base shear force and relative displacement A_{RD}

从图 2 可以看出: 车站结构的 $A_{RD, ult}$ 为 1.87% , $A_{RD, ye}$ 为 1.47% , $A_{RD, ud}$ 为 0.735% 。

4 车站结构的增量动力分析

4.1 地震动的选取

为充分考虑地震作用的复杂性, 本文从美国太平洋地震工程研究中心的强震记录数据库中选取了 10 条原始地震记录来进行 IDA。在 IDA 过程中, 地震动的强度指标一般采用地面峰值加速度 a_{pg} 来表示。根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》规定, 将地震动时程中加速度峰值进行调幅处理, 其幅值为 (0.1 ~ 1.5) g 。所选的 10 条地震动如表 1 所示。

表 1 用于 IDA 的 10 条地震动基本信息表		
Tab.1 10 seismic motion basic information for IDA		
地震波编号	地震波名称	$a_{pg}/(cm/s^2)$
N1	Arequipa (1970-05-31)	278.38
N2	Compuertas (1979-12-21)	186.31
N3	Enola (1982-07-05)	177.73
N4	Nahanni (1985-11-09)	248.41
N5	Puriscal (1991-04-22)	140.23
N6	Grevena (1995-05-15)	62.38
N7	Gopeshwar (1999-03-28)	87.46
N8	Tonalapa (2000-07-21)	378.25
N9	Pahala (2003-08-27)	265.45
N10	Katashina (2013-02-25)	211.36

注: 地震波名称中括号内日期为地震监测台站获取地震波的时间。

4.2 IDA 结果

表 2—表 3 给出了 10 条地震动输入条件下, 车站结构顶板相对底板的位移峰值 Δ_{max} 。图 3 为车站结构在各地震动作用下产生的 Δ_{max} 。图 4 为车站结构的 IDA 曲线。由图 3—图 4 能够看到: 在车站结构位移到达屈服位移限值前, 各地震动作用下的车站结构变形均基本处于线弹性状态, 该结果与静力推覆分析得出的结果基本一致。将表 2—表 3 中的 Δ_{max} 换算成 A_{RD} , 结果如表 4—表 5 所示。

表 2 N1—N5 地震动输入条件下车站结构的 Δ_{max}

Tab.2 Δ_{max} of station structure under N1—N5 seismic motion input condition

a_{pg}/g	不同地震动输入条件下结构的 Δ_{max}/m				
	N1	N2	N3	N4	N5
0.1	0.033 1	0.054 9	0.033 4	0.044 3	0.044 6
0.3	0.066 2	0.109 8	0.066 8	0.088 6	0.089 3
0.3	0.099 2	0.164 7	0.100 2	0.132 9	0.133 9
0.4	0.132 3	0.219 6	0.133 6	0.177 6	0.178 9
0.5	0.165 4	0.274 5	0.167 0	0.221 9	0.223 6
0.6	0.198 4	0.329 4	0.200 4	0.266 2	0.268 2
0.7	0.231 5	0.383 9	0.233 8	0.309 5	0.312 8
0.8	0.264 6	0.438 8	0.267 2	0.354 8	0.357 5
0.9	0.297 6	0.493 7	0.300 6	0.399 2	0.402 1
1.0	0.330 7	0.548 6	0.334 0	0.443 5	0.447 1
1.1	0.363 8	0.603 5	0.367 4	0.487 8	0.491 7
1.2	0.396 8	0.658 4	0.400 8	0.532 1	0.536 4
1.3	0.429 9	0.713 3	0.434 5	0.576 4	0.581 1
1.4	0.463 0	0.768 2	0.467 9	0.620 7	0.625 7
1.5	0.496 4	0.820 8	0.501 3	0.665 0	0.670 3

表 3 N6—N10 地震动输入条件下车站结构的 Δ_{max}

Tab.3 Δ_{max} of station structure N6—N10 under seismic motion input condits

a_{pg}/g	不同地震动输入条件下结构的 Δ_{max}/m				
	N6	N7	N8	N9	N10
0.1	0.067 8	0.036 4	0.042 3	0.033 1	0.017 9
0.3	0.135 6	0.072 4	0.084 7	0.066 2	0.035 7
0.3	0.203 4	0.108 8	0.127 0	0.099 2	0.053 6
0.4	0.270 8	0.144 8	0.169 3	0.131 9	0.071 4
0.5	0.338 6	0.181 2	0.211 7	0.165 0	0.089 3
0.6	0.406 4	0.217 6	0.254 0	0.198 1	0.107 1
0.7	0.473 9	0.253 7	0.296 3	0.231 2	0.125 0
0.8	0.541 7	0.290 0	0.338 6	0.264 2	0.142 9
0.9	0.609 2	0.326 0	0.380 6	0.297 3	0.160 7
1.0	0.675 0	0.362 4	0.422 9	0.330 4	0.178 6
1.1	0.725 6	0.465 3	0.398 9	0.363 1	0.196 4
1.2	0.766 9	0.507 6	0.434 9	0.396 2	0.214 3
1.3	0.798 3	0.550 0	0.471 2	0.429 3	0.232 5
1.4	0.841 0	0.592 3	0.507 6	0.462 3	0.250 4
1.5	0.881 6	0.634 3	0.543 7	0.495 4	0.268 2

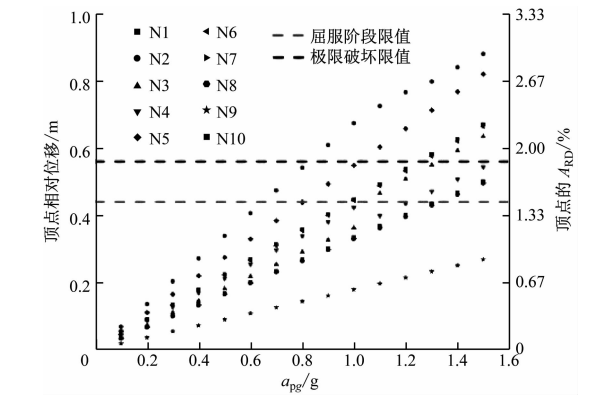


图3 各地震动作用下的车站结构顶点位移

Fig.3 Station structure vertex displacement under each seismic motion

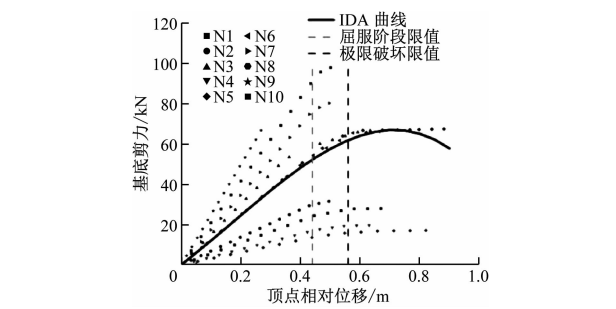


图4 各地震动作用下的车站结构的 IDA 曲线

Fig.4 Station structure IDA curve under each seismic motion

表4 N1—N5 地震动输入条件下车站结构的 A_{RD}

Tab.4 A_{RD} of station structure under N1—N5 seismic motion input condits

a_{pg}/g	不同地震动输入条件下结构的 $A_{RD}/\%$				
	N1	N2	N3	N4	N5
0.1	0.110 2	0.183 0	0.111 3	0.147 7	0.148 8
0.3	0.220 5	0.366 0	0.222 7	0.295 4	0.297 6
0.3	0.330 7	0.549 0	0.334 0	0.443 1	0.446 4
0.4	0.440 9	0.732 0	0.445 3	0.592 0	0.596 3
0.5	0.551 2	0.914 9	0.556 6	0.739 7	0.745 2
0.6	0.661 4	1.097 9	0.668 0	0.887 3	0.894 0
0.7	0.771 6	1.279 8	0.779 3	1.031 8	1.042 8
0.8	0.881 9	1.462 8	0.890 7	1.182 8	1.191 6
0.9	0.992 1	1.645 7	1.002 0	1.330 5	1.340 4
1.0	1.102 3	1.828 8	1.113 3	1.478 3	1.490 3
1.1	1.212 6	2.011 7	1.224 7	1.625 9	1.639 1
1.2	1.322 8	2.194 8	1.336 0	1.773 7	1.788 0
1.3	1.433 0	2.377 8	1.448 4	1.921 4	1.936 9
1.4	1.543 2	2.560 7	1.559 8	2.069 0	2.085 6
1.5	1.654 6	2.735 9	1.671 1	2.216 8	2.234 4

表5 N6—N10 地震动输入条件下车站结构的 A_{RD}

Tab.5 A_{RD} of station structure under N6—N10 seismic motion input condits

a_{pg}/g	不同地震动输入条件下结构的 $A_{RD}/\%$				
	N6	N7	N8	N9	N10
0.1	0.226 0	0.121 3	0.141 1	0.110 2	0.059 5
0.3	0.451 9	0.241 4	0.282 2	0.220 5	0.119 0
0.3	0.677 9	0.362 6	0.423 3	0.330 7	0.178 6
0.4	0.902 8	0.482 8	0.564 4	0.439 8	0.238 1
0.5	1.128 8	0.604 1	0.705 5	0.550 1	0.297 6
0.6	1.354 7	0.725 3	0.846 6	0.660 3	0.357 1
0.7	1.579 6	0.845 5	0.987 6	0.770 5	0.416 7
0.8	1.805 6	0.966 7	1.128 8	0.880 8	0.476 2
0.9	2.030 5	1.086 8	1.268 8	0.991 0	0.535 7
1.0	2.249 9	1.208 1	1.409 8	1.101 2	0.595 3
1.1	2.418 6	1.551 0	1.329 5	1.210 3	0.654 8
1.2	2.556 3	1.692 1	1.449 6	1.320 6	0.714 3
1.3	2.660 9	1.833 2	1.570 8	1.430 9	0.774 9
1.4	2.803 2	1.974 2	1.692 1	1.541 1	0.834 5
1.5	2.938 7	2.114 2	1.812 3	1.651 3	0.894 0

5 车站结构的易损性分析

5.1 钢管混凝土柱车站易损性曲线

对车站 IDA 结果进行处理分析,即可得出车站结构在各水平地震作用下,发生超越不同水平损伤的概率,将其绘制成曲线,即为车站结构的地震易损性曲线。

水平地震动固定时,车站结构在多条地震动作用下的反应规律符合对数正态分布。对于 1 组符合对数正态分布的数字,可采用对数正态概率法拟合,从而得出正态分布的均值及标准差。本文 IDA 结果的拟合如图 5 所示。图 5 中每条直线均代表在

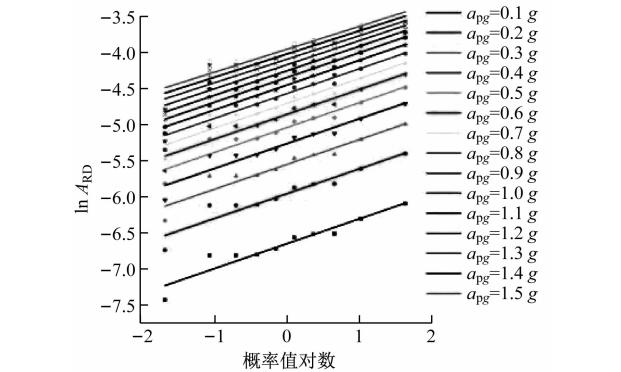


图5 车站结构在各水平地震动下的 A_{RD} 对数正态拟合曲线

Fig.5 A_{RD} logarithmic normal distribution fitting curve of station structure under each horizontal seismic motion

某一个固定地震动水平下,钢管混凝土柱车站所选的10条地震动作用下 A_{RD} 值的拟合结果。其均值与标准差结果汇总如表6所示^[4]。

表6 A_{RD} 对数正态拟合下的 $\mu_{\ln D}$ 及 $\sigma_{\ln D}$

Tab.6 $\mu_{\ln D}$ and $\sigma_{\ln D}$ under A_{RD} logarithmic normal distribution fitting

a_{pg}/g	$\mu_{\ln D}$	$\sigma_{\ln D}$
0.1	-6.655 1	0.346 8
0.3	-5.962 3	0.346 7
0.3	-5.556 7	0.346 7
0.4	-5.269 2	0.347 0
0.5	-5.045 9	0.346 9
0.6	-4.863 6	0.346 9
0.7	-4.710 0	0.346 5
0.8	-4.576 0	0.346 6
0.9	-4.458 5	0.346 5
1.0	-4.353 2	0.346 1
1.1	-4.260 3	0.341 8
1.2	-4.176 5	0.335 9
1.3	-4.100 2	0.328 1
1.4	-4.028 2	0.324 0
1.5	-3.961 7	0.319 5

注: $\mu_{\ln A_{RD}}$ 为 A_{RD} 对数正态分布均值; $\sigma_{\ln A_{RD}}$ 为 A_{RD} 对数正态分布标准差。

根据表6的结果,以及车站结构的位移损伤指标,采用式(2)便可求出给定地震峰值加速度下车站结构发生超过不同水平破坏的概率 P (即超越概率)。其中车站结构分别为轻微破坏、严重破坏和毁坏的超越概率如表7所示。

$$P(A_{RD} > A_{RD,li} | a_{pg}) = 1 - \Phi((\ln A_{RD,li} - \mu_{\ln A_{RD}})/\sigma_{\ln A_{RD}})$$
 (2)

式中:

$A_{RD,li}$ ——结构在不同破坏状态下的位移角限值。

采用式(3)对表7中的结果进行正态分布拟合,即可得到城市轨道交通钢管混凝土柱车站发生不同等级破坏概率的易损性曲线,曲线均值和标准差结果如表8所示。

$$F_R(a_{pg}) = \Phi\left(\ln\left(\frac{a_{pg}}{\mu_{\ln a_{pg}}}\right) / \sigma_{\ln a_{pg}}\right)$$
 (3)

式中:

- F_R ——正态分布函数;
- $\mu_{\ln a_{pg}}$ —— a_{pg} 对数正态分布均值;
- $\sigma_{\ln a_{pg}}$ —— a_{pg} 对数正态分布标准差。

表7 各水平地震动作用下车站结构的超越概率

Tab.7 Summary of exceedance probability of station structure under various horizontal seismic motions

a_{pg}/g	P		
	轻微破坏	严重破坏	毁坏
0.1	0	0	0
0.3	0.001 2	0	0
0.3	0.031 7	0.000 1	0
0.4	0.152 4	0.001 2	0.000 1
0.5	0.350 9	0.008 6	0.001 1
0.6	0.556 7	0.031 8	0.005 4
0.7	0.721 1	0.078 6	0.017 5
0.8	0.834 6	0.152 1	0.042 6
0.9	0.905 2	0.245 5	0.083 3
1.0	0.947 1	0.350 1	0.140 0
1.1	0.971 9	0.453 0	0.205 4
1.2	0.985 8	0.551 4	0.278 5
1.3	0.993 4	0.642 4	0.356 2
1.4	0.996 8	0.723 0	0.439 9
1.5	0.998 5	0.790 5	0.521 9

表8 钢管混凝土柱地铁车站地震易损性曲线的均值及标准差

Tab.8 Mean value and standard deviation of seismic vulnerability curve of CFST column metro station

项目	均值	标准差
轻微破坏	0.570 7	0.345 6
严重破坏	1.154 5	0.337 0
毁坏	1.452 1	0.329 4

5.2 钢管混凝土柱车站与混凝土框架车站易损性对比

近年来,偶有国内学者使用易损性曲线方法对城市轨道交通车站的抗震性能进行研究,研究对象多为常规尺寸的混凝土框架结构车站。如:文献[5]基于IDA方法对城市轨道交通车站结构的抗震性能进行了评价,文献[6]对基于双参数模型的城市轨道交通车站地震易损性进行了分析。

总结对比国内学者给出的常规尺寸下城市轨道交通混凝土框架结构车站地震易损性曲线,以地震峰值加速度为0.8 g时为例,混凝土框架结构车站发生轻微破坏的概率达90%~98%,严重破坏的概率达25%~40%,毁坏的概率达10%~20%;对比本文中钢管混凝土柱车站的地震易损性曲线,车

站结构发生上述 3 种破坏对应的概率分别为 83.46%、15.21%、4.26%。由此可见,使用钢管混凝土柱可提升车站结构的抗震性能。

6 结语

1) 当水平地震动确定时,钢管混凝土柱车站多条地震动作用下的位移反应规律符合对数正态分布,可据此对数据进行拟合分析。

2) 城市轨道交通钢管混凝土柱车站的地震易损性曲线为正态分布曲线,可通过车站结构损伤指标的定义、地震反应结果的分析及易损性曲线标准值与方差的确定等流程得到。

3) 经与常规尺寸混凝土框架结构车站的易损性曲线对比发现,在相同地震作用下,钢管混凝土柱车站发生不同水平破坏的概率更低,抗震性能更好。

4) 随着中华人民共和国国务院令 744 号《建设工程抗震管理条例》的颁布,以及相关规范、标准的相继出台,城市轨道交通结构抗震研究的重要性也越来越高。

本文的研究方法对比目前城市轨道交通行业普遍采用的抗震分析过程具有一定的参考价值,同时也希望将来能有更多、更先进的研究方法逐步应用在城市轨道交通抗震研究工作中。

参考文献

- [1] 李磊,郑山锁,李谦. 基于 IDA 的型钢混凝土框架的地震易损性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4):535.
LI Lei, ZHENG Shansuo, LI Qian. Seismic fragility analysis of SRC structures based on IDA method[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(4):535.
- [2] 常泽民. 钢筋混凝土结构非线性抗震可靠度及地震易损性分

析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.

CHANG Zemin. Nonlinear seismic reliability and seismic vulnerability analysis of reinforced concrete structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

- [3] 姜京伟,李静波,崔春义,等. 基于双参数模型的地铁车站地震易损性分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(5):496.
JIANG Jingwei, LI Jingbo, CUI Chunyi, et al. Seismic vulnerability analysis of subway station based on two-parameter model[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2021, 38(5):496.
- [4] 王丹. 钢框架结构的地震易损性及概率风险分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Dan. Seismic vulnerability and probability risk analysis of steel frame structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [5] JI J, ELNASHAI A S, KUCHMA D A. An analytical framework for seismic fragility analysis of RC high-rise buildings[J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3197.
- [6] PARK J, TOWASHIRAPORN P, CRAIG J I, et al. Seismic fragility analysis of low-rise unreinforced masonry structures[J]. Engineering Structures, 2009, 31(1): 125.
- [7] 吕大刚,李晓鹏,王光远. 基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(2):107.
LYU Dagang, LI Xiaopeng, WANG Guangyuan. Global seismic fragility analysis of structures based on reliability and performance [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(2):107.
- [8] 钟紫蓝,严智豪,史跃波,等. 基于 IDA 方法的地铁车站结构抗震性能评价[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7):680.
ZHONG Zilan, YAN Zhihao, SHI Yuebo, et al. Seismic performance evaluation of station structures based on IDA method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7):680.
- [9] MIDORIKAWA M, AZUHATA T, ISHIHARA T, et al. Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1767.

(收稿日期:2023-04-08)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com