

基于能力谱的高架车站地震易损性分析

束 洋

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 地震易损性分析是一种评估震害损失的方法。采用 Pushover 能力谱分析法对高架车站结构进行抗震性能研究,考察了层间位移角和塑性铰的出现机制,得到了易损性曲线和易损性矩阵。结果表明,高架车站结构实例在各级地震作用下主要发生轻微损坏或较小概率的中等程度损坏,层间位移角符合性能设计要求。分析所用的方法简易可行,结果可供参考。

关键词: 高架车站; Pushover 能力谱; 抗震性能; 易损性分析

中图分类号: TU31

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0252-04

0 引 言

随着我国社会经济的发展,城市轨道交通已经成为减缓交通拥堵问题和提高人们出行效率的有效途径之一。作为一种常见的城规车站结构,双柱墩式高架车站具有占地面积小、对现有交通布局影响小、建设周期较短的优势,在可预见的未来仍将是轨道交通车站的主要结构形式之一。由于受用地限制,双柱墩高架车站通常在上层结构采用大悬挑布置,首层柱墩成为关键受力构件,也是抗震性能相对薄弱的构件,柱墩被破坏会影响生命线工程的畅通,可能会带来更大的次生灾害,后果较为严重。与公路交通相比,城市轨道交通具有线路固定的特点,关键节点发生损坏势必影响全线运营的安全性。因而有必要对高架车站柱墩的抗震性能进行深入研究。

易损性分析是一种全阶段的分析方法,可对结构达到不同损坏程度的概率给出定量结果。陈静恭等人^[1]对有横向系梁的双柱式桥墩进行了地震易损性分析并给出了位移能力的计算经验公式;卓卫东与曾武华^[2]研究了一般桥梁的地震易损性;温增平等许多研究者^[3-5]对房屋结构的抗震易损性进行了理论研究。

虽然地震易损性分析具有明显优点,但在工程结构设计过程中也并不常见,一个重要原因是基于非线性时程法的易损性分析通常计算量巨大。针对道路轨道共线高架车站的相关地震易损性研究很少

的情况,本文拟采用计算量较小的 Pushover 能力谱法对一双柱墩式高架车站工程实例进行易损性分析,并评估结构震损概率,为同类设计提供参考。

1 常规抗震分析

1.1 工程概况

塘下轨道交通高架车站位于温州市域铁路 S3 线一期工程温瑞大道与中心西路交叉口南侧。车站采用路中高架三层侧式车站,与上方快速路合建,属于典型的双柱墩高架路轨共线车站,结构剖面如图 1 所示。其结构主要由车站主体结构、附属结构(含天桥和出入口)、站台上快速路的梁和柱墩、屋面快速路箱梁等部分组成。

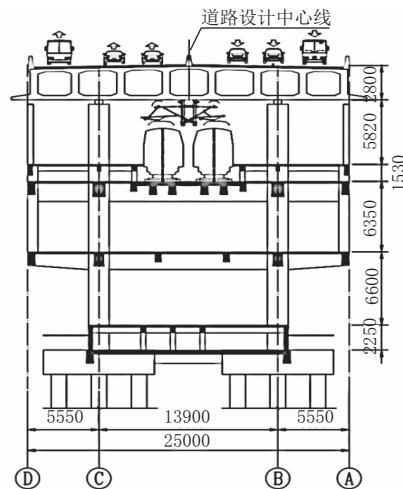


图 1 车站典型横剖面(单位:mm)

1.2 地震动参数与性能指标

分别按三个地震等级确定地震动参数及地震放大系数,如表 1 所示,各地震等级计算要求如下:

在 E1 地震(多遇地震,重现期 100 a, 100 a 超越

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 束洋(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事轨道交通高架车站结构设计工作。

概率为 63%)作用下采用线性反应谱法分析,验算结构强度及稳定性,并对列车运行安全性进行分析(验算墩顶弹性水平位移)^[6]。

在 E2 地震(设防地震,重现期 475 a,50 a 超越概率为 10%)作用下采用线性反应谱法分析,验算结构强度及稳定性。

在 E3 地震(罕遇地震,重现期 2 475 a,50 a 超越概率为 2%)作用下采用非线性时程分析法分析,验算柱墩延性。

表 1 中:T_g 为地震波持续时间,PGA 为地面峰值加速度。

表 1 弹塑性时程分析采用的地震波参数设置

地震波类型	T _g /s	地震波 PGA/(cm·s ⁻²)	场地 PGA/(cm·s ⁻²)	地震放大系数		
				E1	E2	E3
人工波	0.75	37.5	E1=37.5 E2=62.5 E3=150	1	1.667	4
Duzce	0.75	16		2.273	3.393	9.091
Chi-Chi,	0.75	56		0.559	1.389	3.333

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909-2014)^[7],对抗不同强度地震动的抗震性能要求和等如表 2 所示。

表 2 抗震性能目标

地震等级	E1	E2	E3
抗震性能要求	性能要求 I	性能要求 II	性能要求 II
构件性能等级	性能等级 1	性能等级 1	性能等级 2(满足 7.2 条、附录 F.1)
站厅层及其他构件	性能等级 1	性能等级 2	性能等级 2

1.3 结构分析模型

采用空间有限元软件 MIDAS Civil V2021 (V9.10)对结构模型进行抗震性能分析,并采用盈建科 YJK(5.0.0 版)软件进行静力弹塑性补充分析,在 E3 地震作用下则采用塑性铰单元进行弹塑性分析。构建结构有限元模型如图 2 所示。

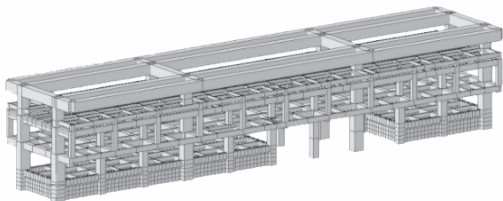


图 2 有限元模型

各软件计算所得的模型动力特性如表 3 所示。MIDAS 与 YJK 的结果在第 1、2 阶主周期上的差别较小,第 3 阶为扭转振型,两者差距在可接受的范围内。

表 3 结构动力特性

振型		周期 /s		
编号	方向	MIDAS	YJK	差值 /%
1	横向	0.971	0.982	2.18
2	纵向	0.842	0.850	0.95
3	扭转	0.728	0.801	11.81

2 能力谱法基本原理

Pushover 分析是一种与反应谱相结合的增量静力弹塑性分析方法的简称,它将多自由度结构的弹塑性反应用单自由度体系来表现,目标是建立一种大震作用下快速评估结构性能的机制。

2.1 Pushover 能力曲线

Pushover 分析法通过施加某种规定分布形式的侧向力或侧向位移,将力或位移逐级单调递增,直至结构倒塌;记录每一级加载后构件出现塑性铰的情况,并相应修改刚度矩阵,将各级加载下的结构基底剪力和顶点位移标记于同一坐标系,各点连线形成 Pushover 曲线(V-Δ 曲线)。

常见的侧向力分布方式主要有沿高度均匀分布、倒三角分布和顶部集中力等形式。对于结构基本自振周期在 1 s 内的结构,宜以倒三角的分布形式分配水平力。

2.2 能力谱

能力谱代表结构抵抗荷载的能力,将基底剪力-顶点位移曲线转换为谱加速度-谱位移曲线(S_a-S_d 曲线,ADRS 格式)即可得到能力谱。标准反应谱与 ADRS 格式的转换可表示为

$$S_d(T_i)=(T_i/2\pi)^2\cdot S_a(T_i) \tag{1}$$

式中:S_a(T_i)是折减后的谱加速度 g。

2.3 需求谱

需求谱代表外部地震作用,将单自由度等效体系下的地震设计反应谱转化为成弹性需求谱,再通过折减阻尼比获得弹塑性需求谱,即得需求谱。实例结果如图 3 所示。

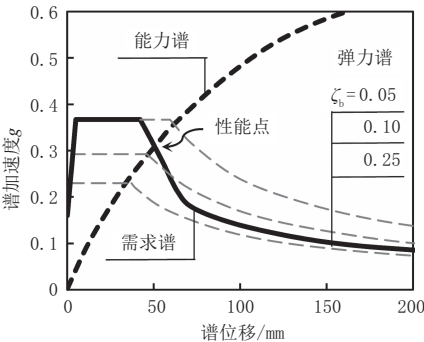


图 3 能力谱与需求谱

由于弹性反应谱只能用于在整个地面震动过程中一直保持弹性状态、同时弹性阻尼始终是5%的结构。在实际的地震中,则应考虑结构的弹塑性状态,所以在此采取了两项措施对弹性反应谱进行修正:修正阻尼比不等于5%的情况;修正推覆过程中结构滞后能量的影响。这两项修正通常根据 Newmark 及 Hall 公式,以将有效阻尼大于5%的需求谱的纵坐标除以折减系数的形式来表示。为与地震区域划分图相符合,下文采用以谱加速度作为输入参数的方式进行计算。

2.4 能力谱法

Pushover 分析法的中心问题是如何确定结构在预定水平地震作用下的损伤情况。美国 ATC40 规范^[8]将运用结构的能力谱和地震需求谱来直接估计结构弹塑性反应的方法称为能力谱法,这一方法具有形式直观、信息丰富的优点。

2.5 E3 地震时的结构状态

推覆至 E3 地震时的塑性发展情况如图 4 所示,塑性铰主要出现在首层柱墩,上层结构的塑性发展较缓慢。各塑性铰延性系数计算结果如图 5 所示,Y 向推覆性能点的损伤情况如图 6 所示。在性能点附近,站台层梁及站台柱顶出现轻微损伤,主要结构构件均未出现屈服情况。

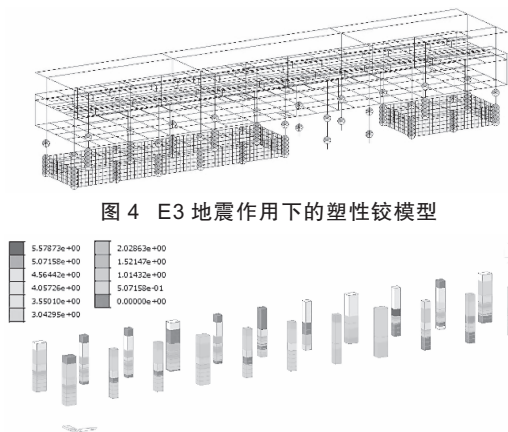


图 4 E3 地震作用下的塑性铰模型

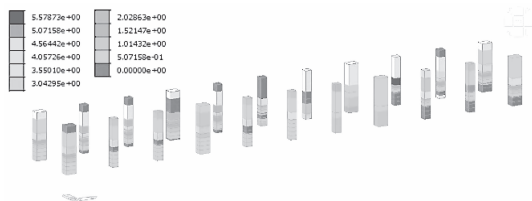


图 5 塑性铰延性系数结果

在设防烈度最不利地震波作用的情况下,96%的框架柱完好,4%的框架柱出现轻微损坏,大部分纵向混凝土的主次梁混凝土没有表现出受拉损伤;在大震作用下,部分混凝土构件受拉开裂,但未出现受压损伤,结构中钢筋也未出现受拉损伤;结构在 E3 地震级别的大震作用下,部分混凝土构件受拉开裂,但均未出现受压损伤,钢筋也尚未屈服,主要为轻微损坏,故认为结构满足预设的 E3 地震下的抗震性能目标。

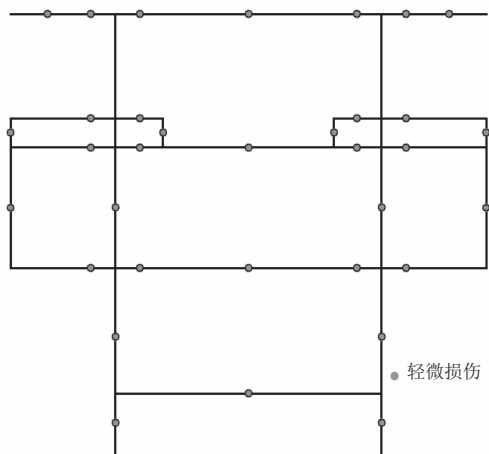


图 6 Y 向推覆性能点损伤

3 易损性分析

3.1 基本步骤

结构易损性分析的基本步骤为:

- (1)建立详细的结构非线性有限元模型;
- (2)确定地震动输入参数 IM 和结构的损伤指标 DM;
- (3)选择结构的地震需求参数 EDP;
- (4)获取增量推覆分析的地震反应样本数据;
- (5)建立地震需求模型 GEDP(edplim);
- (6)定义破坏状态并给出每个破坏状态的结构承载力概率密度;
- (7)计算在不同强度地震作用下的结构反应的超越概率;
- (8)绘制易损性曲线,并得到易损性矩阵。

3.2 损伤指标和强度指标的选取

重要环节之一就是选择表征地震动的强度指标 IM 和结构的损伤指标 DM。选取 IM 的基本原则是:选取能直接反映地震动潜在的破坏效应、且在不同地震动强度下 DM 差异最小的 IM。结合结构动力响应特性,本文以谱加速度峰值作为 IM,以结构最大层间位移角 $\theta_{\max}$ 作为 DM。

3.3 破坏状态的定义

建立柱墩的概率地震需求模型,进行弹塑性 Pushover 分析,选取柱墩位移角作为需求指标,以谱加速度作为地震动参数,形成柱墩在地震作用下对应于不同破坏状态的损伤指标。

结构在倒塌状态时的变形的限值可以选取结构极限破坏状态下的变形值的两倍,因此可以换算出结构处于倒塌状态的层间位移角值^[9],根据规范^[7-8]确定结构在各个破坏状态下对应的层间位移角取值如

表 4 所示。

表 4 各破坏状态下的层间位移角限值

轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
0.002~0.005	0.005~0.015	0.015~0.04	≥0.04

各输入波下的结构层间位移角结果如图 7 所示,最大层间位移角均出现在第 5 层。其中,Chi-Chi 波的位移角最大值为 1/102,为各输入波中的最大结果。弹塑性时程的结果均值为 1/184,能力谱法性能点处的最大层间位移角为 1/172,均未超过中等破坏的范围,说明设计结果符合要求。按能力谱法控制的层间位移角大于时程法结果的平均值,因而安全性相应更高。

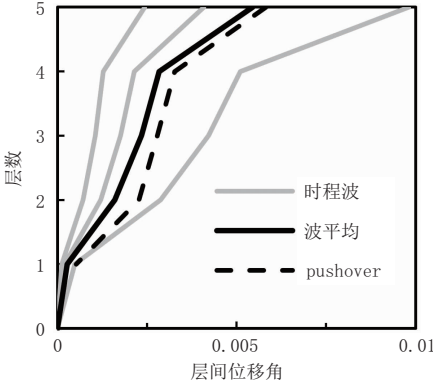


图 7 各输入波下的层间位移角

3.4 结构的破坏概率

结构的易损性是结构本身的固有属性,它从概率意义上定量地刻画结构抗震性能。易损性曲线是达到或超过某个震害等级的概率,通过累积对数正态分布来模拟。已知谱位移 S_d (单位:mm),达到或超过震害等级 d_s 的结构破坏概率 $p(d_s|S_d)$ 为

$$p(d_s|S_d)=\phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}}\ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right] \tag{2}$$

式中: $\bar{S}_{d,ds}$ 、 β_{ds} 分别为结构达到 d_s 级震害的谱位移均值和自然数对数标准差; ϕ 为正态分布累积函数。

3.5 结构易损性曲线

如图 8 所示,在相同地震动强度下,超越概率从大到小,依次为结构被轻微破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌;各破坏等级的超越概率随着结构的损坏程度的增大而呈现减小的趋势。

3.6 结构易损性矩阵

根据易损性曲线即可计算得出结构在地震动时的超越概率具体数值,进而求得易损性矩阵如表 5 所示。

表 5 具体描述出结构在给定地震动等级时处于各破坏状态的概率,从而将累积概率转换为离散概

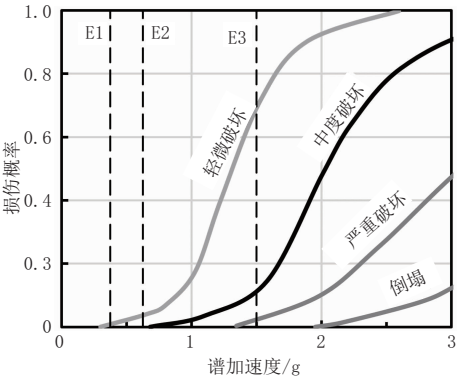


图 8 柱墩结构能力曲线与地震需求曲线

表 5 柱墩结构的易损性矩阵

破坏等级	输入地震峰值加速度(PGA)		
	E1 0.375g	E2 0.625g	E3 1.5g
完好	1	0.96	0.33
轻微	0	0.04	0.58
中等	0	0	0.09
严重	0	0	0.02
倒塌	0	0	0

率。易损性矩阵表明,柱墩结构在 E1 地震及 E2 地震作用下基本不会发生明显破坏;在 E3 地震作用下以轻微破坏为主,可能出现少量中度破坏,但不会出现严重破坏及倒塌的情况。综合而言,该柱墩结构的抗震性能表现良好。

4 结 语

本项目通过采用 Pushover 能力谱分析法对高架车站结构进行抗震性能研究,得出结论如下。

(1)Pushover 能力谱法具有概念清晰、效率较高的优点,通过一次 Pushover 分析可实现用传统结构易损性分析方法需要进行大量弹塑性时程分析计算才能达到的目标,简化了震害预测流程。但同时也要注意结果受假设加载方式的影响,需要加以总结和修正。

(2)通过易损性曲线及易损性矩阵可较直观了解结构在不同强度等级下的抗震性能,对工程结构的抗震能力作出较全面准确的评估。

(3)易损性矩阵可与其他同类工程进行对比,从而获知本工程所处的性能水平,结果可累积形成经验性表达式,有利于设计经验的继承。

参考文献:

[1] 陈静恭,张于晔,耿波.设置横梁的双柱式桥墩地震易损性分析[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):158-163.
[2] 卓卫东,曾武华.公路规则桥梁实用概率地震需求模型[J].地震工程

(下转第 259 页)

算方法的结果基本一致。

从9号到1号拉索,随着拉索长度的增长,无应力索长 S_y 的相差值从1 mm增大到13 mm,而有应力索长 S 却没有出现这样的现象。这说明无应力索长 S_y 的误差,不是有限元模拟曲线拉索产生的,否则 S 和 S_y 都应该有此误差。通过在模型中把拉索划分为1 000个单元,重新计算,得到计算结果与表2完全一致,也佐证了以上结论。可看出在对这10根拉索的线形计算中,有限元计算方法的精度是满足要求的,解析方法对无应力索长 S_y 的计算则存在误差。

经分析可得,解析计算的误差分布的规律是:当拉索与水平面的夹角越小时,解析方法计算得到的无应力索长 S_y 会逐渐偏长,而有应力索长 S 则不受影响。

5 结 语

本文介绍了用有限元软件建立可调节无应力索

长的斜拉索有限元模型、并用二分法迭代计算拉索的线形参数的方法。结果表明:

(1)用有限元方法模拟斜拉索结构,计算其有应力索长、无应力索长、梁端倾角斜率和塔端倾角斜率各参数,其结果与解析算法所得结果基本一致,证明计算结果精确可靠。

(2)当拉索与水平面的夹角较小时,解析方法计算得到的无应力索长会偏长,而且随着夹角的减小,该误差还会进一步增大。但该长度所产生的误差不超过索长的千分之一,对实际工程设计影响很小。

参考文献:

- [1] 程伟,易伟建,刘光栋.斜拉桥柔性索线型分析及快速迭代计算方法[J].公路,1998(6):8-11.
- [2] 华新.斜拉桥塔端张拉拉索倾角修正及拉索主要参数实用计算方法[J].公路,2004(12):20-23.
- [3] 王新敏,ANSYS结构数值分析[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [4] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].

(上接第255页)

- 与工程振动,2014,34(2):64-70.
- [3] 温增平.建筑物地震易损性分析研究[D].哈尔滨:国家地震局地球物理研究所,1999.
 - [4] 叶燎原,潘文.结构静力弹塑性分析的原理和计算实例[J].建筑结构学报,2000,21(1):37-43.
 - [5] 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):107-114.

- [6] 杜兴华.公路铁路一体化高架车站结构抗震分析[J].城市道桥与防洪,2020,5(5):267-268.
- [7] GB 50909—2014,城市轨道交通结构抗震设计规范[S].
- [8] ATC40.Seismic valuation and retrofit of concrete buildings[R]. Redwood City: Applied Technology Council, 1996.
- [9] 杨光,鹿群.基于Pushover能力谱法的RC框架结构地震易损性分析[J].天津城建大学学报,2015,21(5):341.