

基于 IDA 的下弦与撑杆改进构型张弦梁 结构的地震易损性分析

谢洋平, 任宜春, 蒋友宝, 周 浩
(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 采用 IDA 方法进行地震易损性分析, 已成为评估建筑结构抗震性能的常用方法之一。为探究下弦与撑杆改进构型张弦梁结构的抗震性能, 使用 ATC-63 推荐的 15 组地震动记录数据, 选择地震动强度参数结构第一自振周期结构阻尼系数为 5% 的反应谱加速度 $S_a(T_1, 5\%)$, 并以一阶振型中最大位移点的竖向挠度作为评价指标进行研究。基于有限元软件 ANSYS 对该结构进行模拟, 通过对比时程分析结果, 分析不同损伤状态下改进构型的张弦梁结构的抗震性能概率。研究表明: 在面对大型地震时, 此改进构型的张弦梁结构表现出卓越的抗震性能, 拥有显著的防震潜力, 且结构倒塌的风险较低。

关键词: 张弦梁; 地震易损性分析; 地震强度指标; 失效概率; 增量动分析

中图分类号: TU312⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0034-06

doi: 10.13402/j.gejs.2024.07.089

Seismic fragility analysis of beam string structure with improved configuration of lower chord and brace based on IDA

XIE Yangping, REN Yichun, JIANG Youbao, ZHOU Hao

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: The IDA method for seismic fragility analysis has become one of the common methods to evaluate the seismic performance of building structures. In order to explore the seismic performance of the beam string structure with improved configuration of lower chord and brace, 15 sets of ground motion recording data recommended by ATC-63 are used to select the response spectrum acceleration $S_a(T_1, 5\%)$ of the first natural periodic structure of the earthquake motion strength parameter structure with a damping coefficient of 5%, and the vertical deflection of the maximum displacement point in the first-order mode shape is taken as the evaluation index for research. Based on the finite element software ANSYS, the structure is simulated, and the seismic performance probability of the improved configuration of the beam string structure under different damage states is analyzed by comparing the time course analysis results. The results show that in the face of large-scale earthquakes, the improved configuration of the beam string structure shows excellent seismic performance with significant seismic potential and low risk of structural collapse.

Key words: beam string structure; seismic vulnerability analysis; seismic intensity indicators; failure probability; incremental dynamic analysis

地震作为地球上破坏性最显著的自然灾害之一, 常常造成严重的人员伤亡和财产损失。因此, 准确评估和有效改进建筑结构在地震中的性能至关

重要。增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)方法能从概率意义上较为直观地评估结构的抗震性能, 因此该方法在工程抗震领域得到广泛应

收稿日期: 2023-10-13

作者简介: 谢洋平(1998—), 男, 硕士研究生, 从事张弦梁结构方面的研究。

用。IDA 方法是通过逐渐增加地震强度, 在多次动力分析中获取结构在不同地震强度下的响应特征和性能参数^[1]。赵堃等^[2]以某连续梁拱组合体系为工程实例, 采用 IDA 方法分析梁拱组合体系桥梁高墩在地震作用下的易损性; 任叶飞等^[3]使用 IDA 方法, 对 3 种不同自振周期的混凝土框架结构进行倒塌易损性分析, 研究不同地震动输入条件对结构倒塌易损性的影响; 柳明亮等^[4]基于 IDA 方法对基础不均匀沉降张弦梁结构进行地震易损性分析, 以确定基础沉降对张弦梁结构抗震性能的影响。

张弦梁结构的研究在日本 SAITOH M 教授^[5]的首次概念阐述下迅速发展。SAITOH M 通过对张弦梁结构的线性分析、张力控制、预应力影响等多方面的研究, 为实际工程提供了理论依据。此外, 李国强等^[6]通过模型试验和理论分析, 深入研究了张弦梁结构的自振频率、地震响应、振动模态等多个方面, 揭示了在不同地震作用下的结构反应特征。然而, 整体研究中存在一个明显的局限性, 即地震易损性方面的研究相对匮乏。因此, 迫切需要对结构在地震条件下的性能及抗灾能力的深入研究, 以更全面地了解和提高张弦梁结构的安全性。为使改进构型张弦梁结构在地震中展现出更好的抗震性能和有效的损伤控制能力, 本文通过优化下弦与撑杆的设计, 利用 IDA 方法对下弦与撑杆改进构型张弦梁结构进行地震有效损伤分析, 通过比较传统结构和改进结构的地震响应和损伤程度, 旨在深入了解改进结构的性能特点, 并为工程实践提供指导和参考。

1 改进构型张弦梁结构有限元模型及损伤标准划分

1.1 结构简介

张弦梁结构是一种新型的杂交屋盖体系^[7], 与传统结构有明显差异。它由坚固的上弦构件、灵活的拉索和中间支撑杆组成, 形成了自平衡的

独特结构。然而, 传统的张弦梁结构存在冗余度较低的问题, 当拉索的一个截面失效时, 将发生完全坍塌(图 1)。为解决传统张弦梁结构冗余度不足的问题, 蒋友宝等^[8]通过改进下弦和撑杆的构型, 提出一种改进构型的张弦梁结构(图 2), 即利用交叉型腹杆替代传统结构中的竖直型腹杆, 并采用拉杆与拉索的下弦组合(拉索从拉杆中穿过)替代传统的下拉索。这种改进构型可以为结构提供冗余约束, 即使在局部构件失效后, 结构仍能正常工作, 如图 2(b)所示, 节点 1、2 仍然能够维持受力平衡。

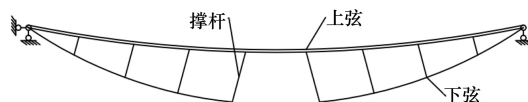


图 1 传统张弦梁结构失效模式

1.2 模型设计

以上海源深体育馆的单榀张弦梁结构作为研究对象, 制作一榀跨度为 5.25 m 的改进构型张弦梁试验模型。模型包括上弦杆、下弦杆 XXG、上撑杆 SCG、下撑杆 XCG、边撑杆 BCG 和下拉索, 具体尺寸如图 3 所示。为确保实际加工的可行性及下拉索与下弦杆的竖向位移和变形的一致性, 选择 Q235B 钢材作为各杆件的材料, 并使用直径为 4 mm 的 1570 钢丝绳作为下拉索。为符合强节点和强连接原则, 球节点的直径约为下撑杆直径的 3.3 倍, 即 100 mm; 厚度约为下撑杆壁厚的 2.3 倍, 即 5 mm。在节点 2 处, 各撑杆与球节点采用气体保护焊进行坡口熔透焊接, 以确保各杆件的轴线在同一竖向平面内通过球心, 并且杆件内力在球节点处实现面内平衡。各杆件的设计参数如表 1 所示。

1.3 有限元模型建立和验证

1.3.1 有限元模型建立

利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对具有高非线性的张弦梁结构在地震情况下的倒塌过程进

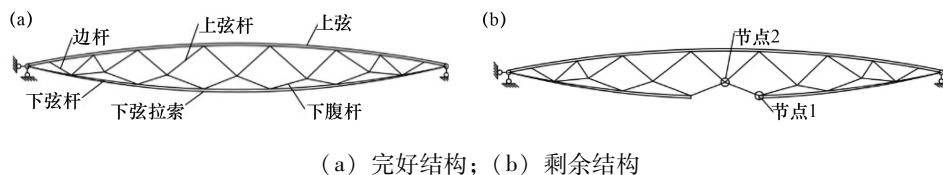


图 2 下弦与撑杆改进构型张弦梁结构

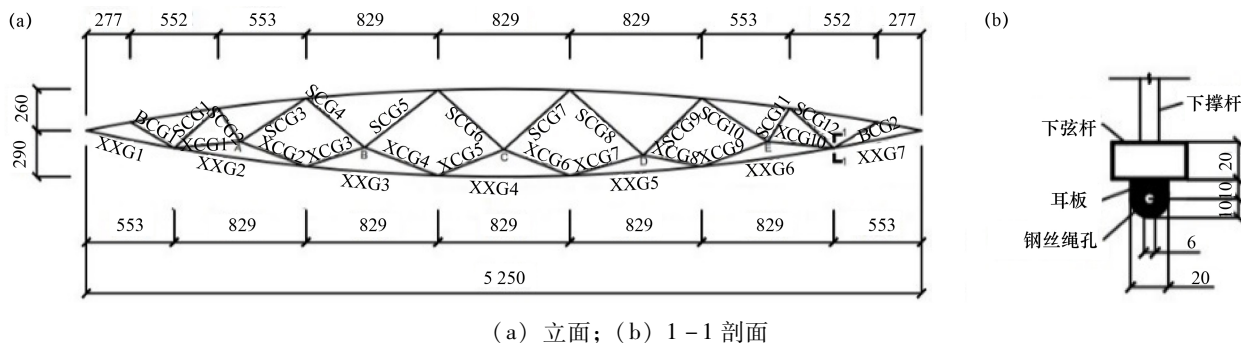


图 3 改进构型张弦梁试验模型

表 1 试验模型杆件设计截面与材料性能

构建类型	截面类型	截面规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断后伸长率/%
上弦杆	矩形钢管	□40×40×1.7	398	480	204	31.6
下弦杆	矩形钢管	□20×40×1.7	372	426	202	24.6
上撑杆	圆钢管	∅21.5×2	377	526	193	28.4
下/边撑杆	圆钢管	∅30×2.2	377	526	193	28.4

行模拟^[4]。根据《ANSYS 结构分析单元与应用》^[9]要求,采用 BEAM189 单元模拟结构的各个杆件。采用双线性强化模型,设置材料的极限应变,将失效应变取为 0.1^[10]。下拉索模拟采用 LINK180 单元,且节点之间通过刚性连接。为了模拟下弦杆内穿柔性拉索的效果,通过耦合下弦杆与下拉索节点的竖向自由度来实现。对于大跨度钢结构阻尼比一般取 0.002 0~0.003 5,采用 Rayleigh 阻尼方法确定结构阻尼^[8],取值为 0.02^[11]。有限元模型如图 4 所示。

1.3.2 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性和可靠性,进行

两种荷载工况下的结构倒塌试验,测定结构跨中挠度和荷载值,并与有限元计算值进行比较,结果如图 5 所示。其中工况 1 为半跨活载等于全跨恒载,工况 2 为半跨活载等于两倍全跨恒载。由图 5 可知:当工况 1 时,试验结果与有限元结果吻合较好;当工况 2 时,试验模型的荷载-位移图前段部分发生了偏移。原因在于,为避免产生平面外位移现象,试验加设了两处侧向支撑,加大了侧向约束装置与试验模型之间的摩擦力,导致在同等荷载下,试验模型的竖向位移小于有限元计算值。

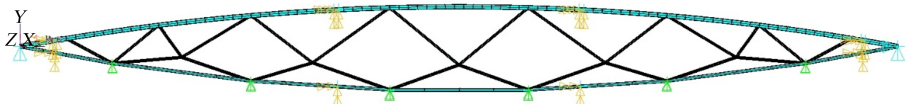
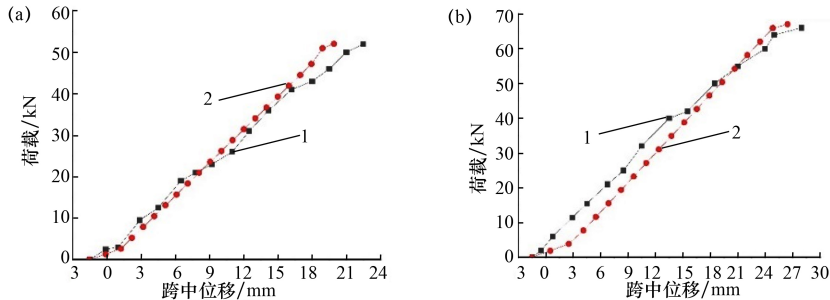


图 4 有限元模型



(a) 工况 1; (b) 工况 2

1—试验; 2—有限元计算。

图 5 跨中挠度试验和有限元计算结果对比

1.4 结构损伤标准划分

目前,许多研究者对结构的极限状态和破坏状态进行了研究和讨论,但对于张弦梁结构不同破坏状态的确定仍未达成一致意见。近年来,基于位移参数的抗震设计方法逐渐受到重视。阳南^[12]用屈服位移乘以不同系数的方式来规定钢结构破坏状况的界限值;严林飞^[13]则认为最大变形和塑性构件比例的双重控制准则可确定结构破坏状态的极限值。虽然通过模态分析能够得知张弦梁结构的横向刚度,这也导致了该结构在地震作用下的主要节点出现一定的侧向位移。因此,本文将在不同损伤状态下的临界值定义为一阶振型的最大位移点的纵向挠度。此挠度可通过静力递增加载后,观察关键部件的应力状况来确定,进而为各类结构的评定提供参考标准。各等级破坏状态的界定如表 2 所示。为获得模型在各个状态下的挠度限制值,进行一阶模态竖向加载的 pushover 分析,结果如表 3 所示。

表 2 结构破坏状态的界定标准

等级	状态描述	判断标准
I	轻微破坏	张弦梁结构到屈服挠度
II	中等破坏	张弦梁结构达到屈服应力和极限应力的中间值
III	严重破坏	上弦梁达到极限应力
IV	倒塌	张弦梁结构达到极限承载力

表 3 改进构型张弦梁结构的各破坏阶段界限值

等级	挠度界限值
I	10.627 20
II	15.940 80
III	20.442 71
IV	22.300 00

2 IDA 方法分析

2.1 地震动强度指标选择

IDA 方法用于地震环境下的非线性结构分析和抗震性能评估,是目前广泛采用的地震易损性分析方法^[14]。地震动强度指标(intensity measure, IM)是结构地震风险评估和易损性分析中的一个关键参数,能有效体现地震动的特性,且与地震记录和结构响应紧密相关。地面峰值加速度(peak ground values of acceleration, PGA)、地面峰值速度(peak

ground values of velocity, PGV)和地面峰值位移(peak ground values of displacement, PGD)均为评估地震影响时的核心参数指标,在 IDA 分析时,常被作为 IM 指标来使用。对于改进构型张弦梁结构体系,为减小结构响应的离散性,选择结构第一自振周期结构阻尼系数为 5% 的反应谱加速度 $S_a(T_1, 5\%)$ (T_1 为结构第一自振周期)为地震动强度指标。

2.2 地震波选择

地震波的选择在 IDA 方法中占据关键地位。当同一个结构受到相同强度但不同特性的地震波影响时,结构的响应可能会有显著的差异。因此,为了保证分析的准确性,采用目标谱匹配法,根据结构的基本周期和工程场地的特性来决定适宜的地震波。从统计学的视角来看,为了准确地模拟结构的动力响应并减少数据的离散性,选择 10 ~ 20 条地震波较为合理。根据 ATC - 63 报告^[15],结合太平洋地震工程研究中心(pacific earthquake engineering research center, PEER)数据,选择 15 条地震波,具体如表 4 所示。

表 4 IDA 分析所选地震波

序号	编号	地震波名称	地面峰值加速度	$S_a(T_1, 5\%)$
1	RSN 126	Gazli	0.71g	1.088 53g
2	RSN 160	IMPVALL	0.76g	0.784 66g
3	RSN 165	IMPVALL	0.28g	0.506 06g
4	RSN 495	NAHANNI	1.18g	1.490 63g
5	RSN 723	Superstition Hills	0.42g	0.776 87g
6	RSN 725	Superstition Hills	0.45g	0.960 04g
7	RSN 741	LOMAP	0.64g	0.482 97g
8	RSN 821	ERZIKAN	0.49g	1.144 87g
9	RSN 829	Cape_Mendocino	0.55g	0.542 66g
10	RSN 900	Landers	0.24g	0.478 49g
11	RSN 960	Northridge_01	0.48g	1.024 71g
12	RSN 1004	NORTHR	0.73g	0.757 02g
13	RSN 1048	NORTHR	0.42g	0.375 65g
14	RSN 1111	Kobe	0.51g	1.884 29g
15	RSN 1602	DUZCE	0.82g	0.757 79g

2.3 IDA 曲线簇

为了更加真实地展示结构的抗震性能,通常需要综合多条 IDA 曲线来形成曲线簇。值得注意的是,不同的地震波形态和特性会导致 IDA 曲线

间的差异,这种差异或曲线的离散程度可以为地震强度指标的选择提供有效线索^[16]。因此,选择合适的地震波和调幅方法是利用 IDA 方法评估和揭示结构抗震性能的关键。

IDA 方法通常采用等步长和变长调幅两种方式。本文选择等步长调幅方法。通过施加增量地震荷载,测量结构中的最大竖向位移来获得结构的最大位移与 IM 之间的关系。图 6 为 IDA 曲线簇。由图 6 可知:张弦梁结构属于柔性结构,具备良好的抗震性能,因此,斜率差异并不显著。

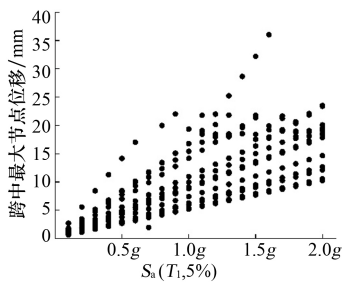


图 6 IDA 曲线簇

3 地震易损性分析

3.1 概率地震需求模型

采用特定失效状态的概率方法评估结构的抗震性能,具体如式(1)所示。两个关键参数 S_c 和 S_d 分别代表结构的强度和其面对的需求或负荷。为较好地描述和模拟结构响应的变异性,这两个参数通常被假定为遵循对数正态分布。通过对不同震级或强度条件下的失效概率进行统计分析,得到结构的易损性曲线^[12]。

$$P_f = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \varphi\left(\frac{\ln(1) - \lambda}{\xi}\right) = \varphi\left(\frac{\lambda}{\xi}\right) \quad (1)$$

式中: P_f 为失效概率; S_d 为地震需求参数; S_c 为结构抗震能力; λ 、 ξ 分别为 $\ln(S_d/S_c)$ 的平均值和标准值。

3.2 结构地震易损性曲线

为模拟单榀结构在 Y 方向的响应,在模型 Y 方向上施加地震激励。通过二次回归拟合地震响应数据,确定地震响应与 $S_a(T_1, 5\%)$ 之间的线性关系,如图 7 所示。此拟合还将产生结构的需求概率函数,如式(2)所示,为地震评估提供有价值的参考。

根据结构损伤等级分类标准,获得模型各级地震易损性曲线的具体表达式,如式(3)~(6)所示。

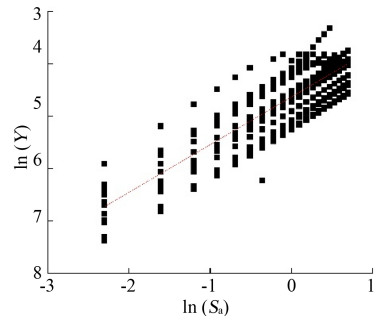


图 7 结构概率需求分析曲线

$$\ln(Y) = 0.91054(\ln S_a) - 4.6352 \quad (2)$$

$$P_f(0.0106272) =$$

$$\varphi \frac{0.91054(\ln S_a) - 4.6352 - \ln(0.0106272)}{0.5} \quad (3)$$

$$P_f(0.0159408) =$$

$$\varphi \frac{0.91054(\ln S_a) - 4.6352 - \ln(0.0159408)}{0.5} \quad (4)$$

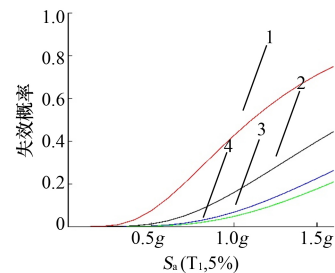
$$P_f(0.02044271) =$$

$$\varphi \frac{0.91054(\ln S_a) - 4.6352 - \ln(0.02044271)}{0.5} \quad (5)$$

$$P_f(0.0223) =$$

$$\varphi \frac{0.91054(\ln S_a) - 4.6352 - \ln(0.0223)}{0.5} \quad (6)$$

基于式(3)~(6),得到模型在不同损伤程度下的地震易损性曲线,如图 8 所示。由图 8 可知:当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 $0.12g$ 时,保证了结构的完好性;当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 $0.72g$ 时,可以得知各种破坏状态的准确概率:当结构完好率为 80% 时,结构轻微破坏的概率为 15%,中等破坏的概率则为 4%,严重破坏的概率为 1%;当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 $1.2g$ (超大地震) 时,结构依然能够保持其完整性,只有较低的严重破坏和倒塌概率。



不同失效模式: 1—LS I; 2—LS II; 3—LS III; 4—LS IV。

图 8 地震易损性曲线

表 5 为地震设防烈度为 7 度和 8 度时结构的易损性表现。由表 5 可知:在 7 度和 8 度多遇地

表 5 结构的三水准易损性矩阵 %

地震水准	不同极限状态下的失效概率				
	完好	轻微	中等	严重	倒塌
7 度(多遇)	100	0	0	0	0
7 度(罕遇)	80	15.0	4.0	1.0	0
8 度(多遇)	100	0	0	0	0
8 度(罕遇)	44	29.6	13.1	3.2	9.1

震时, 结构将维持结构完好; 在 7 度罕遇地震时, 结构完好的概率为 80%, 轻微破坏的概率为 15.0%, 中等破坏的概率为 4.0%, 严重破坏的概率为 1.0%, 不会发生倒塌; 在 8 度罕遇地震时, 结构完好的概率为 44.0%, 轻微破坏的概率为 29.6%, 中等破坏的概率为 13.1%, 严重破坏的概率为 3.2%, 倒塌的概率为 9.1%。

4 结 语

地震易损性分析是改进构型张弦梁结构设计过程中的关键步骤。它揭示了结构从弹性变形到塑性变形直至倒塌的过程, 为改进构型张弦梁结构的灾害评估提供了重要参考依据。在现代地震工程中, 概率方法已成为量化建筑结构抗震性能的趋势。本文通过 IDA 方法进行地震易损性分析, 选择了结构第一自振周期下阻尼系数为 5% 对应的反应谱加速度作为地震动强度指标, 并选用了 15 条地震波进行模拟分析得到易损性曲线。易损性曲线是一个可视化工具, 可用于预测和评估结构在不同震级下的反应。结果表明改进构型张弦梁结构在 7 度和 8 度罕遇地震设防烈度下表现出强大的稳定性和低倒塌风险, 显示出卓越的抗震潜力。但是在地震易损性分析中, 本文仅考虑了单向张弦梁结构, 未考虑双向和幅式张弦梁结构, 因此, 未来的研究需要考虑更为复杂的张弦梁结构在地震作用下的情况。

参考文献:

[1] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 19-25.

[2] 赵堃, 付旺旺, 史国良, 等. 多跨连续梁拱组合体系桥高墩地震易损性分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(2): 101-109.

[3] 任叶飞, 尹建华, 温瑞智, 等. 结构抗倒塌易损性分析

中地震动输入不确定性影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 115-125.

[4] 柳明亮, 王常浩, 张虎, 等. 基于 IDA 的基础不均匀沉降张弦梁结构的地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2022, 38(4): 72-82.

[5] SAITOH M. Study on mechanical characteristics of a light-weight complex structure composed of a membrane and a beam string structure [J]. John F Abel, 1994: 632-641.

[6] 李国强, 沈祖炎, 丁翔, 等. 上海浦东国际机场 R2 钢屋盖模型模拟三向地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999(2): 18-27; 42.

[7] 白正仙, 刘锡良, 李义生. 新型空间结构形式: 张弦梁结构[J]. 空间结构, 2001(2): 10; 33-38.

[8] 蒋友宝, 陈奕琳, 张梦华, 等. 下弦与撑杆改进构型张弦梁结构抗连续倒塌动力试验研究[J]. 建筑结构学报 2023, 44(4): 178-187.

[9] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[10] 张月强, 丁洁民, 张峥. 大跨度钢结构抗连续倒塌动力分析关键问题研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 49-56.

[11] 蒋燊, 倪建公, 瞿革, 等. 复杂高层钢结构抗连续倒塌能力分析关键技术研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 155-165.

[12] 阳南. 单向张弦梁结构的地震易损性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016

[13] 严林飞. 半刚性节点钢框架的地震易损性分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[14] 汪梦甫, 曹秀娟, 孙文林. 增量动力分析方法的改进及其在高层混合结构地震危害性评估中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 104-109; 121.

[15] 陈飞跃, 任宜春, 尹志祥. 一种基于谱加速度均值的新型地震动强度指标的提出及应用[J]. 工程建设, 2022, 54(11): 1-7.

[16] 高慧. 基于 IDA 的既有大跨空间钢结构三维地震易损性分析[J]. 建筑施工, 2022, 44(8): 2003-2006.