

地震作用下多层桥梁结构弹塑性分析

张 玥¹, 薛 磊¹, 杨宝刚¹, 周 敕²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学桥梁与隧道
陕西省重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要 目的 研究地震作用下双层及三层桥梁结构塑性铰的产生机制,明确多层桥梁桥墩的出铰位置及出铰顺序。**方法** 以某双层三跨及三层三跨钢筋混凝土箱型简支桥梁为背景,基于 Sap2000 中的桥梁模块建立非线性的有限元模型,采用增量动力的分析方法,绘制双层及三层桥梁结构的 IDA 曲线,分析地震作用下双层及三层桥梁结构塑性铰的出现位置及顺序。**结果** 结果表明:对于双层桥梁结构,塑性铰可能出现在底层桥的墩底和墩顶、顶层桥的墩顶位置;对于三层桥梁结构,塑性铰可能出现在底层桥的墩顶和墩底、中间层桥的墩顶、顶层桥的墩顶位置;两种结构均是底层桥墩底的塑性铰先出现。**结论** 对于多层桥梁结构,底层桥的墩底以及各层的墩顶会出现塑性铰,其余各层的墩底不出现塑性铰。

关键词 双层及三层桥梁结构;塑性铰;增量动力分析;墩底

中图分类号 TU997;U442.5+5

文献标志码 A

Elastoplastic Analysis of Multi-storey Bridge Structures under Earthquake Action

ZHANG Yue¹, XUE Lei¹, YANG Baogang¹, ZHOU Mi²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China, 710054; 2. Key Laboratory for Bridge and Tunnel Engineering of Shaanxi, Chang'an University, Xi'an, China, 710054)

Abstract: The purpose of this study is to study the generation mechanism of plastic hinge in double and three-layer bridges under earthquake action, making clear the hinge position and hinge sequence of the pier of multi-layer bridge. Taking a double-layer and three-layer reinforced concrete box simply supported bridge as the background. Based on the CSiBridge, a nonlinear finite element model was established. Incremental dynamic analysis method was adopted to draw IDA curves of double-layer and three-layer bridge structures and analyze the occurrence position

收稿日期:2020-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51978062);长安大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(300102210513);陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2018-TD-040)

作者简介:张玥(1978—),女,副教授,博士,主要从事桥梁抗风抗震与振动控制等方面研究。

and sequence of plastic hinges of double-layer and three-layer bridge structures under earthquake action. The results show that: for the double-layer bridge structure, plastic hinge may appear at the bottom and top of the pier of the bottom bridge and the top of the top bridge. For the three-layer bridge structure, plastic hinge may appear on the pier top and bottom of the bottom bridge, the pier top of the middle bridge, and the pier top of the top bridge. The bottom plastic hinge appears first in both structures. For multi-layer bridge structures, plastic hinge will appear at the bottom of the bottom bridge and at the top of each layer, while no plastic hinge will appear at the bottom of the other layer.

Key words: double-layer and three-layer bridge structures; plastic hinge; incremental dynamic analysis; pier bottom

城市经济的高速发展及人口的迅速增加,使得我国的交通网络面临巨大的压力^[1]。多层桥面的桥梁可以实现人车分流,解决由城市空间受限所导致的交通堵塞,在今后的一段时间里我国将会加大对多层桥梁建设的投入^[2]。然而,近年来,国内外地震频发,由地震导致的建筑结构发生破坏的实例已屡见不鲜^[3-6],再加上国内外对于多层桥梁结构的抗震设计可借鉴的资料十分有限^[7-12],尚无成熟的理论提供参考,进行多层桥梁结构的动力分析就显得尤为迫切。

多层桥梁的桥墩受力具有多样性及复杂性,其塑性铰的出现位置及时间与单柱墩有很大的差距,我国的《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[13]及《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)^[14]中仅给出了单层桥梁的桥墩塑性铰可能出现的位置,对于多层桥梁的桥墩并无说明。基于此,

笔者以某双层三跨及三层三跨混凝土箱型简支桥梁为背景,采用增量动力的分析方法,给出多层桥梁桥墩塑性铰的产生机制,以期充实桥梁抗震设计理论,完善抗震规范。

1 工程背景

以某双层三跨及三层三跨混凝土箱型简支桥梁为背景,双层桥梁的总体布置图及断面图如图 1 所示。主梁断面为单箱三室截面,桥墩采用直径为 1.3 m 的框架式桥墩,基础采用直径为 1.5 m 的桩基础;三层桥梁的总体布置图及断面图如图 2 所示。上层桥与中层桥主梁为单箱四室截面,底层桥主梁为单箱三室截面;桥墩为 2 × 1.3 m 的框架式桥墩,桩基础呈三角形分布,直径为 1.3 m。桥墩和基础纵筋均为 HRB335 级钢筋,支座采用板式橡胶支座,型号为: GYZ550 × 110。

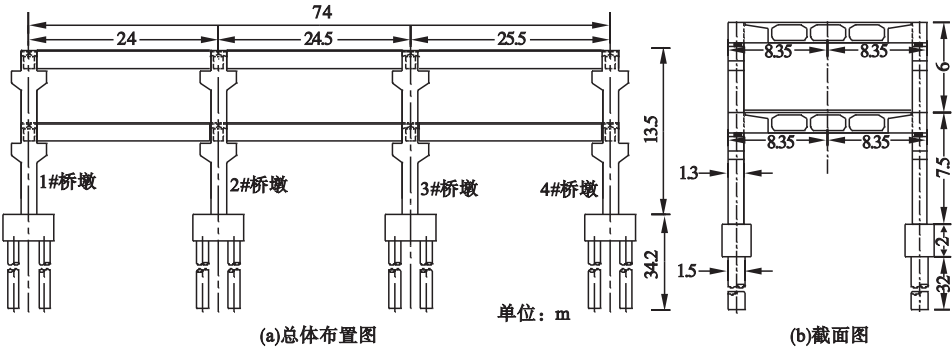


图 1 双层桥梁示意图
Fig. 1 Diagram of double-deck bridge

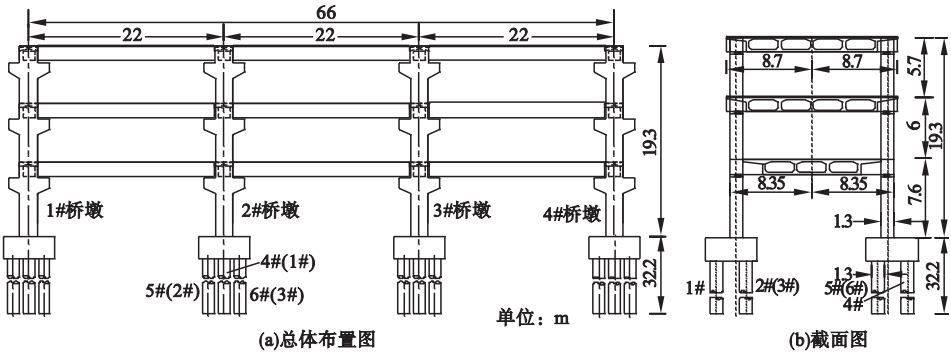


图 2 三层桥梁示意图

Fig. 2 Diagram of the three-story bridge

2 有限元模型

2.1 模型建立

地震响应提取第二跨的计算结果,建模时在计算模型第二跨的左右末端各加一联作为边界条件,且在临联结构上施加边跨荷载,考虑相邻结构和边界条件的影响。采用 Sap2000 中的桥梁模块分别建立 4 墩 3 跨的两种桥梁模型,模型的主梁、桥墩、系梁、承台

及桩基础均采用梁单元模拟,桥面铺装采用面荷载模拟,采用双线性的恢复力模型模拟板式橡胶支座,滑动前的竖向刚度为 5.94×10^6 kN/m,剪切刚度为 3 564 kN/m。场地类别为 II 类,特征周期为 0.35 s。基础长度为 30 m,采用分层土弹簧模拟桩土相互作用,每 2 m 施加一个土弹簧,弹簧刚度根据我国规范的“m”法计算,其中 $m_{\text{动}} = 2 m_{\text{静}}$ 。有限元模型见图 3 所示。

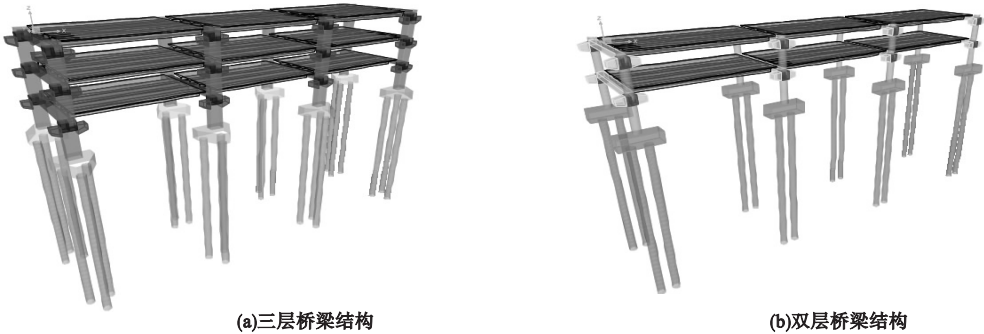


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 地震动的输入

合适的地震记录对于增量动力分析尤为重要,根据我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[15]的选波规定,选取符合条件的 4 条天然地震波,再加上规范反应谱拟合的一条人工合成地震波,共计 5 条地震波,地震波信息见表 1 所示。

表 1 地震波信息				
Table 1 Seismic wave information				
序号	地震名称	记录站	地震峰值 加速度 (PGA)/ (m·s ⁻²)	震级
1	EI centro	Array#9	0.350	6.9
2	Northridge	City Hall Grounds	0.370	6.7
3	San Fernando	LA-Hollywood, Stor	0.225	6.6
4	Taft	Taft Lincoln school	0.156	7.36
5	合成波	—	0.208	—

在地震动调幅的过程中,地震动幅值由 0.1 g 增加到 1.4 g,增加步长取 0.1 g。调整方式如下:

$$\dot{a}(t) = a(t) \cdot \frac{\dot{A}_{\max}}{A_{\max}}.$$

(1)

式中: $a(t)$ 、 A_{\max} 分别为原地震记录的加速度曲线和峰值; $\dot{a}(t)$ 、 \dot{A}_{\max} 分别为调整后地震的加速度曲线和峰值。

3 关键截面的弯矩曲率分析

截面的弯矩 – 曲率分析是评价截面抗震性能的重要手段之一。为方便记录,在描述关键截面的弯矩 – 曲率分析时采用截面编号的形式进行记录,截面编号示意图如图 4 所示。恒载作用下,双层及三层桥梁的弯矩曲率分析数值如表 2、表 3 所示。

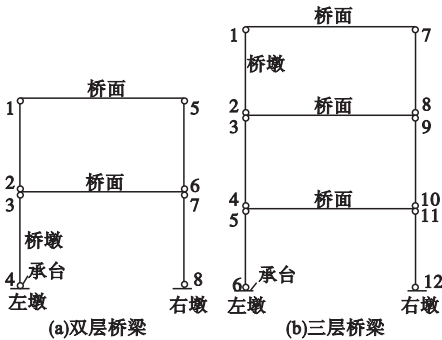


图 4 截面编号示意图

Fig. 4 Schematic diagram of section number

表 2 双层桥梁弯矩 – 曲率分析数值

Table 2 Moment-curvature analysis of double-deck bridge

截面	轴力/kN	等效屈服曲率/ 10 ⁻² m ⁻¹	极限曲率/ 10 ⁻² m ⁻¹
1#	-245	0.28	2.27
2#	-6 753	0.31	1.09
3#	-6 968	0.31	1.07
4#	-13 495	0.37	0.73
5#	-245	0.28	2.27
6#	-6 753	0.31	1.09
7#	-6 968	0.31	1.07
8#	-13 495	0.37	0.73

表 3 三层桥梁弯矩 – 曲率分析数值

Table 3 Moment-curvature analysis of three-storey bridge

截面	轴力/kN	等效屈服曲率/ 10 ⁻² m ⁻¹	极限曲率/ 10 ⁻² m ⁻¹
1#	-309	0.12	3.81
2#	-7 862	0.15	2.53
3#	-8 112	0.15	2.5
4#	-15 678	0.17	1.88
5#	-15 929	0.17	1.87
6#	-22 254	0.20	1.51
7#	-309	0.13	3.81
8	-7 860	0.15	2.53
9#	-8 110	0.15	2.5
10#	-15 677	0.17	1.88
11#	-15 927	0.17	1.87
12#	-22 252	0.19	1.51

4 多条地震波下的 IDA 曲线

增量动力分析最重要的一步就是选取合适的地震动强度参数,常见的地震动强度指标有地震峰值加速度、地震峰值速度、结构第一个周期振型与阻尼对应的反应谱加速度值和结构的折减系数等^[16-18]。地震动强度参数选取越合适,结构性能指标的偏差就越小,分析难度会下降。传统的地面峰值加速度 *PGA* 能够直接、有效的反映地震动的特性,选择 *PGA* 作为地震动强度参数,选用曲率作为判断结构进入屈服及破坏的指标。

4.1 IDA 分析的终止条件

笔者进行 IDA 分析是为了确定墩柱塑性铰的潜在位置,因此应保证所有可能出现的塑性铰均不能发生破坏,即塑性铰区的曲率不能大于极限曲率,一旦任一塑性铰截面的曲率大于极限曲率,IDA 分析终止^[19]。以双层桥梁结构的 San Fernando 波为例,绘制单条地震动下的 IDA 曲线,如图 5 所示。图 5 中的黑色实线表示相应截面极限曲率的数值,黑线与曲线相交,表明该截面已达到极限曲率。

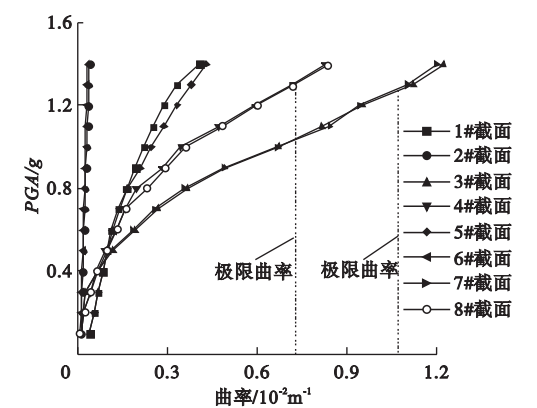


图5 双层桥梁 San Fernando 波的 IDA 曲线

Fig.5 IDA curves of San Fernando waves of a double-deck bridge

由图5可知,1#、2#、5#及6#截面在 PGA 达到 1.4 g 时,截面不会发生破坏;当 PGA 超过 1.2 g 后,3#及7#截面的曲率已经超过极限曲率,截面已经发生破坏;当 PGA 超过 1.3 g 后,4#及8#截面的曲率会超过极限曲率。以3#及7#截面达到极限曲率时所对应的 PGA 作为 IDA 分析的终止条件,即 PGA 为 1.2 g 时,IDA 分析终止。

同理,可以给出双层及三层桥梁结构在其余地震动分析时的终止条件,如表4所示。其中, San Fernando 地震波中的三层桥梁没有确定终止条件,这是因为 PGA 达到 1.4 g

时,截面并未达到极限曲率,已无必要再增大 PGA ,因此三层桥梁 San Fernando 地震波分析的终止条件暂不考虑。

表4 各地震波分析的终止条件

Table 4 Termination conditions of seismic wave analysis in different regions

地震波	双层桥梁终止地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	三层桥梁终止地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
EI centro	0.5 g	1.2 g
Northridge	0.6 g	1.2 g
San Fernando	1.2 g	—
Taft	0.6 g	1.2 g
合成波	0.5 g	1.1 g

4.2 双层桥梁的 IDA 曲线

将所选取的5条地震波按照前述的方法,以 0.1 g 为步长,严格执行前述的终止条件,绘制不同地震波时的 IDA 曲线,在 IDA 曲线中标明各个截面等效屈服曲率的位置,即可看出该曲率对应的 PGA ,若该截面已达到等效屈服曲率,则该截面出现塑性铰。将各个截面达到等效屈服曲率时所对应的地震峰值加速度的结果列于表5中。双层桥梁的桥墩左右为对称结构,鉴于篇幅有限,仅给出1~4#截面的 IDA 曲线,如图6所示。

表5 等效屈服曲率对应的地震峰值加速度

Table 5 Earthquake peak acceleration corresponding to equivalent yield curvature

截面	等效屈服曲率/ 10^{-2} m^{-1}	人工波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	EI centro 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	Northridge 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	San Fernando 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	Taft 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
1#	0.28	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.4 g~0.5 g	1.1 g~1.2 g	0.4 g~0.5 g
2#	0.31	—	—	—	—	—
3#	0.31	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.7 g~0.8 g	0.4 g~0.5 g
4#	0.37	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.1 g~0.2 g	0.3 g~0.4 g	0.2 g~0.3 g
5#	0.28	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.4 g~0.5 g	1.1 g~1.2 g	0.4 g~0.5 g
6#	0.31	—	—	—	—	—
7#	0.31	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.7 g~0.8 g	0.4 g~0.5 g
8#	0.37	0.2 g~0.3 g	0.2 g~0.3 g	0.1 g~0.2 g	0.3 g~0.4 g	0.2 g~0.3 g

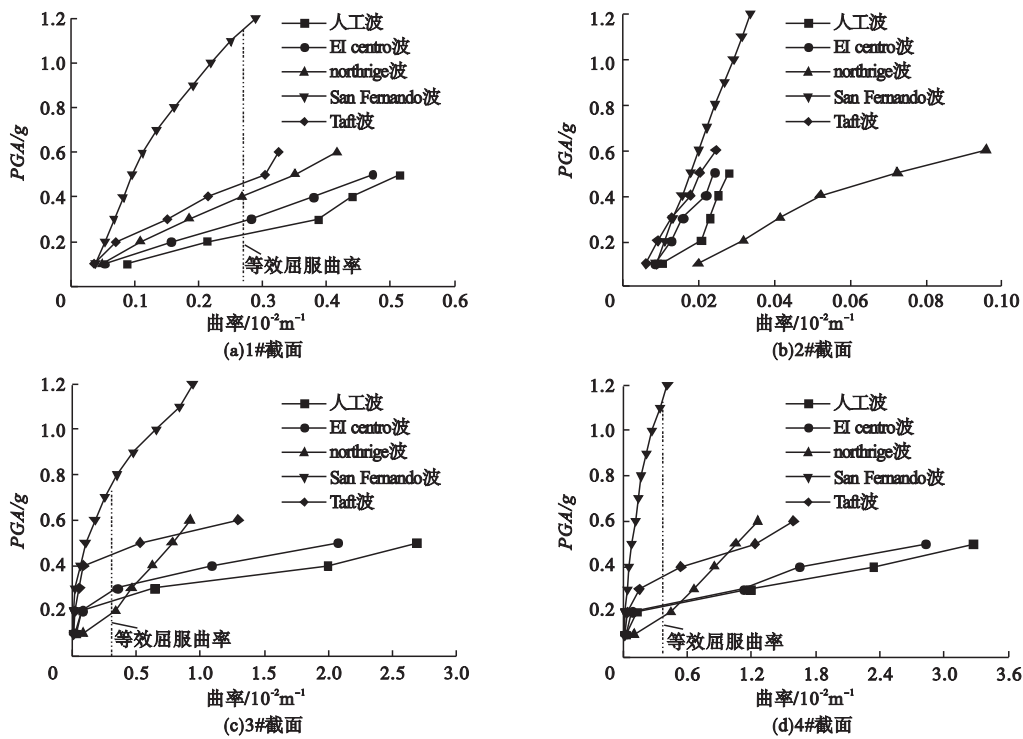


图 6 关键截面的 IDA 曲线

Fig. 6 IDA curves of key sections

图 6 中未出现黑色虚线的表示截面的曲率并未达到等效屈服曲率。在 1 ~ 8#截面中,达到等效屈服曲率的截面有 1#、3#、4#、5#、7#及 8#截面,也就是说这些截面均出现了塑性铰,而 2#及 6#截面基本不会出现塑性铰,按照出现塑性铰时 PGA 的大小,可初步得出塑性铰的产生顺序为底层桥墩底→底层桥墩顶→顶层桥墩顶。塑性铰的出现位置如图 7 所示。

4.3 三层桥梁的 IDA 曲线

根据同样的方法,给出多层桥梁结构的 IDA 曲线,三层桥梁的桥墩左右为对称结构,

仅给出 1 ~ 6#截面的 IDA 曲线,如图 8 所示。

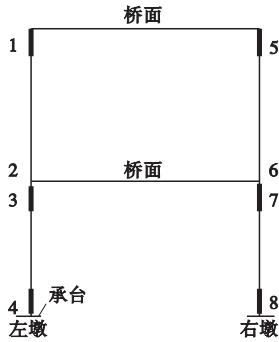
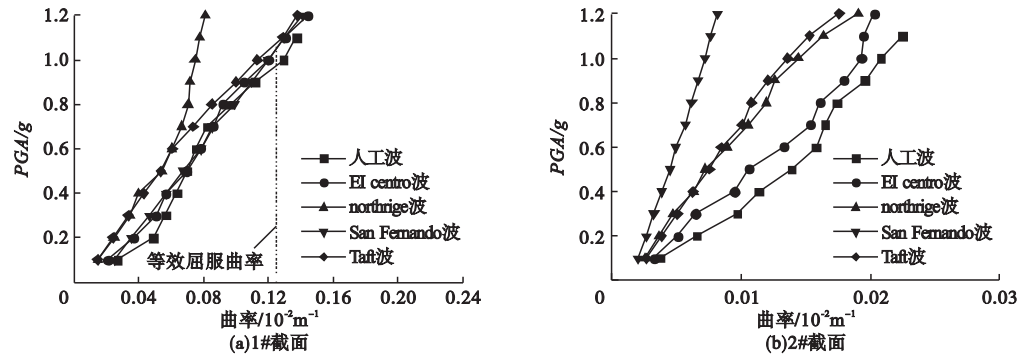


图 7 双层桥梁的桥墩塑性铰的出现位置

Fig. 7 Location of plastic hinge on pier of a double-deck bridge



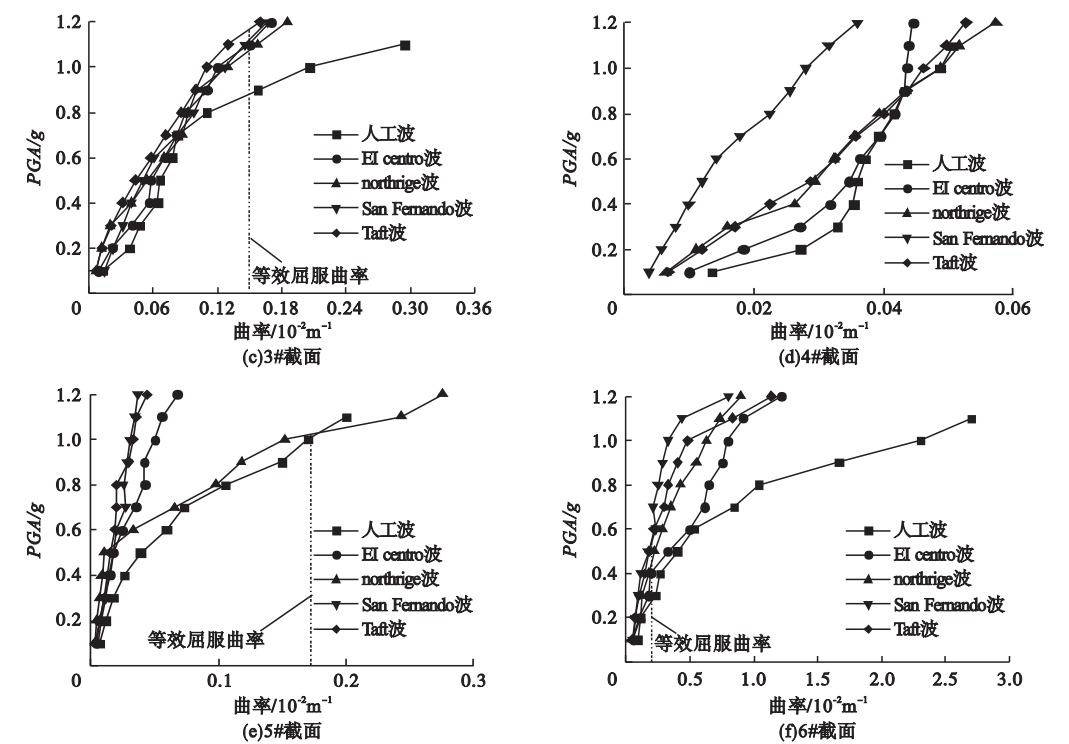


图8 三层桥梁的 IDA 曲线

Fig. 8 IDA curve of the three-story bridge

将各个截面达到等效屈服曲率所对应的 PGA 结果列于表6。

表6 等效屈服曲率对应的地震峰值加速度

Table 6 Earthquake peak acceleration corresponding to equivalent yield curvature

截面	等效屈服曲率/ 10^{-2}m^{-1}	El centro 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	Northridge 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	San Fernando 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	Taft 波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	人工波地震加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
1#	0.12	1.0 g ~ 1.1 g	—	1.0 g ~ 1.1 g	1.0 g ~ 1.1 g	0.9 g ~ 1.0 g
2#	0.15	—	—	—	—	—
3#	0.15	1.0 g ~ 1.1 g	1.0 g ~ 1.1 g	1.1 g ~ 1.2 g	1.1 g ~ 1.2 g	0.8 g ~ 0.9 g
4#	0.17	—	—	—	—	—
5#	0.17	—	1.1 g ~ 1.2 g	—	—	1.1 g ~ 1.1 g
6#	0.20	0.3 g ~ 0.4 g	0.4 g ~ 0.5 g	0.5 g ~ 0.6 g	0.5 g ~ 0.6 g	0.2 g ~ 0.3 g
7#	0.13	1.0 g ~ 1.1 g	—	1.0 g ~ 1.1 g	1.0 g ~ 1.1 g	0.9 g ~ 1.0 g
8#	0.15	—	—	—	—	—
9#	0.15	1.0 g ~ 1.1 g	1.0 g ~ 1.1 g	1.0 g ~ 1.1 g	1.1 g ~ 1.2 g	0.8 g ~ 0.9 g
10#	0.17	—	—	—	—	—
11#	0.17	—	1.0 g ~ 1.1 g	—	—	1.0 g ~ 1.1 g
12#	0.19	0.3 g ~ 0.4 g	0.4 g ~ 0.5 g	0.5 g ~ 0.6 g	0.5 g ~ 0.6 g	0.2 g ~ 0.3 g

在 1~12#截面中,达到等效屈服曲率的截面有 1#、3#、5#、6#、7#、9#、11#及 12#截面,不同的地震波,激发的塑性铰的个数稍有差异,但变化不大,塑性铰出现的位置有 1#、3#、5#、6#、7#、9#、11#及 12#截面,其余截面基本不会出现塑性铰,按照出现塑性铰时 PGA 的大小,可初步得出塑性铰的产生顺序为底层桥墩底→中间层桥墩顶→顶层桥墩顶→底层桥墩顶。塑性铰的出现位置如图 9 所示。

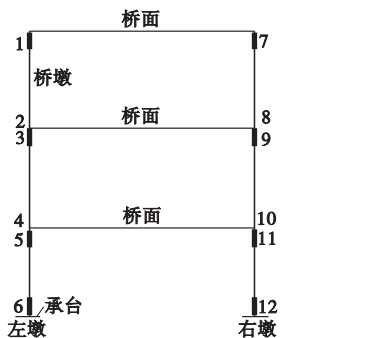


图 9 三层桥梁的桥墩塑性铰的出现位置

Fig. 9 The location of the plastic hinge of the pier of a three-storey bridge

5 塑性铰位置的比较

对于单层带有盖梁的双柱墩桥梁,抗震规范中已给出了塑性铰的出现位置,笔者又同时给出了双层桥梁及三层桥梁桥墩塑性铰的出现位置,如图 10 所示。

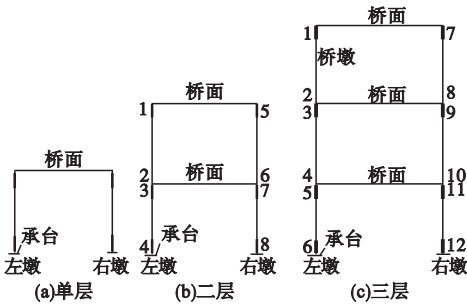


图 10 不同层数桥梁桥墩塑性铰位置的比较

Fig. 10 Comparison of plastic hinge positions of bridge piers at different levels

对于单层桥梁,塑性铰常常出现在墩顶和墩底位置;对于双层桥梁,塑性铰的出现位

置有顶层桥的墩顶位置,底层桥的墩顶和墩底,而顶层桥的墩底位置不会出现塑性铰;对于三层桥梁,塑性铰的出现位置有顶层桥的墩顶,中间层桥的墩顶,底层桥的墩顶和墩底位置,而顶层桥和中间层桥的墩底位置不会出现塑性铰。双层及三层桥梁往往底部的塑性铰较易产生。

从前述的三种桥型来看,塑性铰的出现位置有较大的差异,但同时也有一定的规律可言。对于桥梁结构而言,最底层的桥墩底部会出现塑性铰,其余层墩底不出现塑性铰,各层的墩顶均会出现塑性铰,在进行延性抗震设计时,可以在这些塑性铰的三潜在位置设置抗震措施。

6 结 论

(1)对于双层桥梁结构,塑性铰可能出现在底层桥的墩底和墩顶、顶层桥的墩顶位置,塑性铰的产生顺序为底层桥墩底→底层桥墩顶→顶层桥墩顶;对于三层桥梁结构,塑性铰可能出现在底层桥的墩顶和墩底、中间层桥的墩顶、顶层桥的墩顶位置,产生顺序为底层桥墩底→中间层桥墩顶→顶层桥墩顶→底层桥墩顶。

(2)对于多层桥梁结构而言,最底层的桥墩底部会出现塑性铰,其余层墩底不出现塑性铰,各层的墩顶均会出现塑性铰。

参考文献

[1] 张彤锋. 城市立交曲线梁桥静力及动力性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
(ZHANG Tongfeng. Study on static and dynamic properties of curvilinear beam bridge at urban overpass [D] Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.)
[2] 毛云飞,杨海峰,宗雪梅. 多层桥梁不同结构体系冲击系数特性分析[J]. 特种结构,2014, 31(5): 79 - 84.
(MAO Yunfei, YANG Haifeng, ZONG Xuemei. Analysis of mutil-level bridge impact coefficient characteristics of different structural systems of multi-storey bridge [J]. Special structure, 2014, 31(5): 79 - 84.)
[3] 赵竞,项长生,周宇,等. 楔形挡块对中小跨径梁桥横向抗震性能的影响[J]. 地震工程学

- 报,2020,42(1):22-31.
(ZHAO Jing, XIANG Changsheng, ZHOU Yu, et al. Effect of wedge block on the transverse seismic performance of small-and medium-span girder bridges [J]. Journal of seismic engineering,2020,42(1):22-31.)
- [4] PENG Tianbo, GUO Zhihao. A new design strategy for seismic safety in super earthquakes of continuous girder bridges[J]. Measurement, 2020,163(15):1-11.
- [5] KILANITIS I, SEXTOS A. Impact of earthquake-induced bridge damage and time evolving traffic demand on the road network resilience [J]. Journal of traffic and transportation engineering (english edition), 2019,6(1):35-48.
- [6] 徐略勤,傅沛瑶,李建中,等. 板式橡胶支座梁桥的典型横向震害及其影响因素分析[J]. 振动与冲击,2020,39(2):209-217.
(XU Lueqin, FU Peiyao, LI Jianzhong, et al. Typical transverse damage of girder bridges supported by laminated rubber bearings and its influential factors [J]. Vibration and impact, 2020,39(2):209-217.)
- [7] 彭天波,李建中,范立础. 能力设计方法在双层高架桥梁抗震设计中的应用[J]. 世界桥梁,2009(1):12-15.
(PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Application of capacity design method to seismic design of double-deck viaduct [J]. World bridge,2009(1):12-15.)
- [8] 宗雪梅. 城市多层立交结构基于性能抗震设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2014.
(ZONG Xuemei. Performance-based seismic design method of mutil-level interchange structure [D]. Xi' an: Chang' an University, 2014.)
- [9] 张羽. 双层连续梁桥地震响应分析[D]. 大连:大连理工大学,2012.
(ZHANG Yu. Seismic response analysis of double-deck continuous girder bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)
- [10] 杨宝林,艾杰,刘允中. 山区高速公路双层高架桥双层框架式桥墩拟静力试验分析[J]. 公路,2013(8):33-39.
(YANG Baolin, AI Jie, LIU Yunzhong. Quasi-static test analysis of double deck frame pier of mountain highway double deck viaduct [J]. Highway,2013(8):33-39.)
- [11] 杜艳韬. 双层高架连续梁桥抗震性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
(DU Yantao. Study on seismic performance of double-deck continuous girder bridge [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.)
- [12] 潘盛山,许文俊,庄年,等. 双层桥支座布置对抗震性能的影响[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(增刊1):160-163.
(PAN Shengshan, XU Wenjun, ZHUANG Nian, et al. The influence of the layout of double deck bridge support on the seismic performance[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2010, 30 (S1): 160-163.)
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01-2020 [S]. 北京:人民交通出版社,2008.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for seismic design of highway bridges:JTG/T 2231-01-2020 [S]. Beijing: China Communications Press,2008.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 1666-2-2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban bridges: CJJ 1666-2-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.)
- [16] SRBIC M, IVANKOVIC A M, BROZOVIC T. Bending moment curvature relationship as an indicator of seismic resistance of older bridge piers[J]. Građevinar,2019,71(6):481-488.
- [17] 周道传,董作超,邵建华,等. 公路桥梁钢筋混凝土墩柱位移延性研究[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(3):62-67.
(ZHOU Daochuan, DONG Zuochao, SHAO Jianhua, et al. Study on displacement ductility performance of RC highway bridge columns [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2014,34(3):62-67.)
- [18] 李玉. 钢筋混凝土框架结构基于IDA方法的易损性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
(LI Yu. Seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures based on the IDA method [D]. Xi' an: Xi' an University of Architecture and Technology,2015.)
- [19] 赵人达,高能,贾毅,等. 基于IDA的大跨连续梁桥地震易损性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(4):672-679.
(ZHAO Renda, GAO Neng, JIA Yi, et al. Seismic vulnerability analysis of long-span continuous beam bridge based on incremental dynamic analysis. [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33 (4):672-679.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)